



Universidade de Aveiro
2018

Departamento de
Eletrónica, Telecomunicações e Informática

Sérgio Ivo
Marques Ferreira

**Desenvolvimento de um veículo elétrico em escala
reduzida**



Sérgio Ivo
Marques Ferreira

**Desenvolvimento de um veículo elétrico em escala
reduzida**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Eletrónica e Telecomunicações realizada sobre orientação científica dos professores:
Professor Dr. Rui Manuel Escadas Ramos Martins, Professor Auxiliar do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro
Professor Dr. Alexandre Manuel Moutela Nunes da Mota, Professor Associado do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Ao meu orientador pelo apoio que me forneceu durante o desenvolvimento desta dissertação.

À minha família, em especial à minha esposa, pela compreensão do tempo despendido na concretização da tese e pela estabilidade emocional dada.

Ao meu irmão Pedro pela ajuda na revisão linguística deste documento e pelos melhores conselhos.

o júri

Presidente

Prof. Dr. Paulo Bacelar Reis Pedreiras

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro

Arguente

Prof. Dr. Daniel Filipe Albuquerque

Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Eletrotécnica da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Instituto Politécnico de Viseu

Vogal

Prof. Dr. Rui Manuel Escadas Ramos Martins

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro (orientador)

palavras-chave

Veículo elétrico pequena escala, tração integral, motor embutido na roda, segurança automóvel

resumo

Esta dissertação tem como principal objetivo o desenvolvimento de um veículo elétrico em escala reduzida com tração integral, através de um motor embutido em cada roda.

Foi usado o teorema de Buckingham-pi na obtenção dos parâmetros que permitem uma semelhança dinâmica com veículos de grande escala.

O veículo desenvolvido será capaz de se assemelhar à realidade, com o ajuste de vários parâmetros, possibilitando o teste de sistemas de segurança.

Realização de testes para validação do modelo e comparação dos resultados com o modelo teórico desenvolvido anteriormente.

keywords

Small scale electric vehicle, all-wheel drive, in-wheel motor, car safety

abstract

This dissertation has the purpose of developing a small scale electric vehicle with full wheel drive, through an engine in each wheel.

Buckingham-pi theorem was used to obtain parameters that allow a dynamic similarity with a large scale vehicle.

The developed vehicle will be similar to real vehicles, with several parameter adjustments, allowing safety system tests.

Carry out tests to validate the model and compare the results with the theoretical model previously developed.

Índice

Figuras.....	iii
Tabelas	v
Lista de acrónimos	vi
1. Introdução	1
1.1 Motivação.....	2
1.2 Objetivos do trabalho	2
1.3 Estrutura da dissertação.....	2
2. Estado de arte	5
2.1 Veículos elétricos	5
2.2 História dos veículos elétricos.....	5
2.3 Dinâmica e controlo do veículo	7
2.4 Controlo do veículo.....	8
2.5 Veículo elétrico com tração integral	10
2.6 PID – Algoritmo para controlo de veículos elétricos	11
2.7 Modelação de veículos em pequena escala	12
2.7.1 Teorema de buckingham-pi.....	12
2.7.2 Semelhança dinâmica.....	13
2.7.3 Veículos à escala	14
2.8 Baterias para carros elétricos.....	15
3. Material e Métodos.....	17
3.1 Estabelecimento de um modelo em pequena escala.....	18
3.1.1 Escolha de um modelo automóvel e teste de consistência à escala.....	20
3.1.2 Aspetos estruturais/chassis	21
3.1.3 Roda, motor e sensor de velocidade	22
3.1.4 Direção e servo motor	26
3.1.5 Controlador de motores e microcontrolador.....	28
3.1.6 Aspetos energéticos.....	29

3.1.7	Modelação 3D e construção final	30
3.1.8	Arquitetura de controlo	32
3.1.9	Implementação de Código para controlo do veículo	33
3.2	Parametrização para adequação à escala	35
3.2.1	Localização do centro de gravidade	36
3.2.2	Cálculo do momento de inércia.....	38
3.2.3	Análise dos parâmetros Π	40
3.2.4	Ensaio durante a construção do veículo.....	42
3.3	Enquadramento do VPE no modelo teórico	42
4.	Resultados	45
4.1	Rotação, velocidade e aceleração	46
4.1.1	PWM de 40%	46
4.1.2	PWM de 60%	50
4.1.3	PWM de 80%	54
4.2	Velocidade máxima.....	58
4.3	Aceleração máxima	59
4.4	Diâmetro de viragem.....	60
5.	Conclusão e trabalho futuro	63
6.	Bibliografia	65
7.	Modelo 3D	68

Figuras

Figura 1 – Veículo elétrico i3 a ser carregado na via pública [11].....	6
Figura 2 – Modelo linear da bicicleta [15].....	7
Figura 3 – Ângulo de deslizamento dos pneus [17]	8
Figura 4 – Comportamento das rodas em curva com o diferencial mecânico [21].....	9
Figura 5 – Sistema de controlo de tração (TCS) [24].....	9
Figura 6 – Sistema de controlo eletrónico de estabilidade (ESP) [25].....	10
Figura 7 – Carro elétrico com quatro rodas com motores elétricos embutidos, em progresso na Universidade de Swinburne [31].....	11
Figura 8 – Illinois Roadway Simulator (IRS) [14].....	14
Figura 9 – Pennsylvania University Rolling Roadway Simulator (PURRS) [16].....	14
Figura 10 – Relação entre Baterias de Veículos Elétricos Células de Hidrogénio para 320 e 480 km [42].....	15
Figura 11 – Diagrama geral de todos os componentes que fazem parte do veículo protótipo a desenvolver	19
Figura 12 – Renault Megane Coupé de 1999 telecomandado à escala de 1/14.....	20
Figura 13 – Modelo em 3D do chassis, a partir do veículo de pequena escala	22
Figura 14 – Gráfico da eficiência, potência, velocidade e corrente do motor [47]	23
Figura 15 – Perspetivas da instalação do sensor de velocidade no motor.....	24
Figura 16 – Sensores de efeito de Hall U1 e U2 (TLE4946-2K)	25
Figura 17 – Impulsos originados pelos polos do disco magnético.....	25
Figura 18 – Montagem dos grupos compostos por roda, motor e sensor de velocidade no chassis	26
Figura 19 – Sistema de engrenagens que compõem a direção	27
Figura 20 – Direção para a esquerda.....	27
Figura 21 – Direção para a direita.....	27
Figura 22 – Controlador de motores Adafruit Motor/Stepper/Servo Shield para Arduino Kit - v2.3.....	28
Figura 23 – Kit de desenvolvimento Arduino Mega.....	29
Figura 24 – Regulador de tensão com voltímetro de medição à entrada e à saída.....	30
Figura 25 – Modelo 3D do VPE.....	31
Figura 26 – Renderização do modelo 3D do VPE	31
Figura 27 – Veículo real de pequena escala.....	32
Figura 28 – Diagrama de fluxo de funções	34
Figura 29 – Posicionamento do VPE em equilíbrio sobre uma aresta fina entre eixos.....	36
Figura 30 – Posicionamento do VPE em equilíbrio sobre uma aresta fina entre rodas	36
Figura 31 – Localização real do centro de gravidade no VPE	37

Figura 32 – Disposição das forças no VPE, para o cálculo do centro de gravidade	37
Figura 33 – Disposição das massas pelo VPE para o cálculo do MI	39
Figura 34 – Sistema de medição do coeficiente de rigidez do pneu [36].....	41
Figura 35 – RPM das rodas individualmente para PWM de 40%.....	47
Figura 36 – Média da RPM das 4 rodas para PWM de 40%	48
Figura 37 – Velocidade das rodas individualmente para um PWM de 40%	48
Figura 38 – Aceleração das rodas individualmente para um PWM de 40%	49
Figura 39 – Velocidade e aceleração média para um PWM de 40%	49
Figura 40 – Comparação da velocidade dos modelos teórico e prático para um PWM de 40% .	50
Figura 41 – RPM das rodas individualmente com PWM de 60%.....	51
Figura 42 – Média da RPM das 4 rodas para PWM de 60%.....	51
Figura 43 – Velocidade das rodas individualmente para um PWM de 60%	52
Figura 44 – Aceleração das rodas individualmente para um PWM de 60%	52
Figura 45 – Velocidade e aceleração média para um PWM de 60%	53
Figura 46 – Comparação da velocidade dos modelos teórico e prático para um PWM de 60% .	53
Figura 47 – Rotação das rodas individualmente para um PWM de 80%	54
Figura 48 – Média da RPM das 4 rodas para PWM de 80%	55
Figura 49 – Velocidade das rodas individualmente para um PWM de 80%	55
Figura 50 – Aceleração das rodas individualmente para um PWM de 80%	56
Figura 51 – Velocidade e aceleração média para um PWM de 80%	56
Figura 52 – Comparação da velocidade dos modelos teórico e prático para um PWM de 80% .	57
Figura 53 – Velocidade máxima	58
Figura 54 – Evolução da velocidade em relação à velocidade máxima	58
Figura 55 – Comparação da velocidade dos modelos teórico e prático para um PWM de 100%	59
Figura 56 – Comparação da aceleração máxima dos modelos teórico e prático	60
Figura 57 – Diâmetro de viragem para a direita.....	61
Figura 58 – Diâmetro de viragem para a esquerda.....	61
Figura 59 – Distâncias entre o servomotor e as rodas frontais.....	62

Tabelas

Tabela 1 – Nomenclatura das variáveis e parâmetros do modelo do veículo	17
Tabela 2 – Tabela comparativa de diversas características dimensionais entre o veículo real, à escala, réplica e o respetivo desvio	21
Tabela 3 – Comparativo de materiais em relação ao peso, rigidez, facilidade de modelação e custos.....	21
Tabela 4 – Parâmetros dos motores elétricos DC.....	24
Tabela 5 – Testes para medição da autonomia do VPE	30
Tabela 6 – Comparativo dos parâmetros Π de veículos reais com o VPE com base em [35].....	40
Tabela 7 – Parâmetros do veículo utilizados para a simulação teórica	43
Tabela 8 – Parâmetros do motor elétrico utilizados para a simulação teórica	43
Tabela 9 – Significado dos símbolos apresentados neste capítulo	45
Tabela 10 – Valores de referência para um PWM de 40%	47
Tabela 11 – Valores de referência para um PWM de 60%	50
Tabela 12 – Valores de referência para um PWM de 80%	54
Tabela 13 – Comparativo entre valores de referência e os valores práticos do VPE para os vários PWM	57
Tabela 14 – Comparativo entre velocidades máximos nos testes práticos e teóricos para os vários PWM	57
Tabela 15 - Comparação do raio de viragem entre o VPE e o veículo real.....	62

Lista de acrónimos

4WD	<i>Four-Wheel Drive</i>
ABS	<i>Anti-lock Braking System</i>
BEV	<i>Battery Electric Vehicles</i>
CAD	<i>Computer-aided design</i>
CG	<i>Centro de gravidade</i>
CNC	<i>Comando numérico computadorizado</i>
ECM	<i>Electronic Control Module</i>
EUA	<i>Estados Unidos da América</i>
FCEV	<i>Fuel Cell Electric Vehicles</i>
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicles</i>
IRS	<i>Illinois Roadway Simulator</i>
MI	<i>Momento de inércia</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCAP	<i>European New Car Assessment Programme</i>
PHEV	<i>Plug-in Hybrid Electric Vehicles</i>
PID	<i>Proportional Integral Derivative</i>
PURRS	<i>Pennsylvania University Rolling Roadway Simulator</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RPM	<i>Rotações por minuto</i>
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
TCS	<i>Traction Control System</i>
VDC	<i>Tensão contínua</i>
VPE	<i>Veículo desenvolvido de pequena escala</i>

1. Introdução

A história do automóvel tem mais de três séculos e destaca-se como uma das invenções mais notáveis de todos os tempos. Desde a era pioneira até à era mais tecnológica, todas elas permitiram um conjunto de invenções e mudanças na sociedade, permitindo consequentemente, avanços noutras áreas [1]. No entanto, o sector dos transportes tem a maior parte da energia total consumida em todo o mundo, devido ao crescimento populacional [2]. Ao mesmo tempo, o sector automóvel está diretamente ligado a três grandes problemas atuais: petróleo, alterações climáticas e dependência energética [3].

Alguns países criaram um plano de redução de emissões de poluentes. Ao mesmo tempo, a evolução da indústria automóvel chegou a um ponto que, por questões ambientais e de poupança, desenvolveu mecanismos de investigação em busca de novas formas de propulsão e geração de energia [4] e é aqui que o veículo elétrico ganha destaque face aos convencionais de combustão.

No ano de 2010, algumas marcas automóveis como a Nissan, Mitsubishi, Chevrolet e Tesla apostaram no mercado dos carros elétricos e carros híbridos [5].

Em termos gerais, o principal elemento deste trabalho é um veículo de pequena escala com as quatro rodas controladas por quatro motores elétricos independentes, alimentados por uma bateria e um sistema de direção nas rodas da frente controlado por um servomotor. Um veículo de pequena escala é um modelo de menor dimensões com similaridades e comportamentos dinâmicos proporcionais a um veículo de larga escala [6].

Inicialmente procedeu-se à criação de um modelo de veículo de pequenas dimensões, que contempla o levantamento e escolha dos componentes necessários, criação de uma arquitetura de controlo de todos os elementos selecionados e desenvolvimento de software de controlo para a obtenção de um protótipo capaz de responder aos objetivos.

1.1 Motivação

A evolução da indústria automóvel conduz à construção de veículos cada vez mais seguros, ao aumento da performance e a uma maior preocupação ambiental. Apesar de já existirem muitas soluções que permitem o estudo e o desenvolvimento destes fatores, estas estão direcionadas para veículos de combustão, recorrendo a sistemas de engrenagens para o controlo integral do veículo. Por este motivo, surge a necessidade de criar um veículo de pequena escala totalmente elétrico, com tração integral através de motores embutidos em cada roda, com baixo custo e capaz de se assemelhar a veículos de grande escala.

A criação de uma plataforma com estas características vai permitir o estudo de sistemas de segurança de uma forma segura, rápida e com possibilidade de repetibilidade de testes. Desta forma, torna-se mais fácil validar algoritmos de controlo, antes de os implementar em veículos de grande escala.

Para além das vantagens anteriormente mencionadas, este veículo de pequena escala é propulsado por um motor elétrico em cada roda, sendo conhecido por disponibilizar um elevado binário imediatamente disponível no arranque, pelo facto de não possuir engrenagens entre os eixos, entre rodas e por estar dotado de uma direção controlada por um servomotor.

Este veículo será dotado de um microcontrolador de fácil introdução de algoritmos de controlo, com a possibilidade de programar percursos, assegurando o ensaio do seu comportamento em situações semelhantes, possibilitando o ajuste de variáveis à medida que os testes vão decorrendo.

Durante esta dissertação serão mencionados todos os passos que estiveram na origem da construção deste protótipo, os métodos para tornar esta plataforma semelhante a veículos de grande escala, testes de performance e a averiguação de que os dados fornecidos pelo veículo são fidedignos.

1.2 Objetivos do trabalho

Para a elaboração deste trabalho, foram considerados os seguintes objetivos:

- Desenvolver um veículo protótipo elétrico de pequena escala com quatro motores elétricos, um por roda, controlados de forma independente desde a sua projeção em modelos 3D até à sua conceção física;
- Obtenção dos parâmetros Π , por forma a permitir criar uma semelhança dinâmica com veículos de grande escala;
- Submeter o veículo protótipo elétrico a uma rotina de testes para validação do modelo e comparação dos resultados com o modelo teórico desenvolvido anteriormente.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em seis capítulos:

- Na primeira secção, será incluída uma introdução com um enquadramento do projeto e uma breve descrição do mesmo, assim como a motivação para o trabalho desenvolvido, os objetivos a atingir e a estrutura do documento;

- Na segunda secção, será desenvolvida uma revisão de literatura existente, com foco nos veículos elétricos e sua história, mecanismos de controlo dos veículos elétricos e alguns conceitos teóricos para avaliação de sistemas com motores elétricos em cada roda;
- Na terceira secção, será explicada a metodologia seguida neste estudo, como a descrição de todo o processo de desenvolvimento do projeto, projeção em 3D do protótipo, conceção física, parametrização para adequação à escala e rotina de testes, para validação do modelo;
- Na quarta secção, serão apresentados todos os resultados, com uma análise mais pormenorizada aos resultados mais relevantes para este estudo;
- Na quinta secção, será exposta uma discussão dos resultados, conclusões e perspetivas futuras decorrentes do trabalho realizado;
- Anexo A, imagens do modelo.

2. Estado de arte

Nesta secção, a literatura mais relevante será revista de forma a introduzir conceitos fundamentais para este projeto. Para uma melhor análise e entendimento da conceção do protótipo e da rotina de testes realizada ao longo deste projeto, é importante contextualizar alguns conceitos relacionados com veículos elétricos, assim como a evolução dos mesmos. Serão também introduzidos alguns modelos de controlo para este tipo de veículo, assim como alguns conceitos matemáticos que serão expostos ao longo desta revisão de literatura.

2.1 *Veículos elétricos*

Os veículos elétricos são uma tendência futura, devido às possibilidades de desenvolvimento sustentáveis que providenciam, assim como às vantagens em relação a outros tipos de veículo, nomeadamente os de combustão interna [7]. Adicionalmente, alguns autores como Yong, Ramachandaramurthy, Tan, & Mithulananthan referem que estes podem melhorar a segurança energética, desenvolver a economia mundial com a criação de novas indústrias e proteger o meio ambiente [5], sendo estes tipos de veículos desenvolvidos também com o intuito de reduzir a dependência mundial no petróleo para transportes e respetivas emissões de dióxido de carbono [3]. No entanto, os veículos elétricos têm três problemas críticos que merecem consideração: baixa autonomia, altos tempos de carga e custos altos [8], problemas estes que irão ser referidos também ao longo deste projeto.

2.2 *História dos veículos elétricos*

Apesar de historicamente não ser possível provar com máxima precisão quem foi o pioneiro no desenvolvimento destas tecnologias, o autor do primeiro carro com células primárias não recarregáveis foi o escocês Robert Anderson e o autor da primeira locomotiva totalmente elétrica foi o americano Thomas Davenport. [9] No início da conceção deste tipo de veículos, as baterias não eram recarregáveis, o que fazia com que este tipo de veículos não se tornassem muito úteis até ao início do século XX, onde começaram a surgir os primeiros veículos elétricos com as suas baterias com a possibilidade de se poderem recarregar [10].

Do século XIX até ao início do século XX, acreditava-se que a eletricidade iria ser a responsável número um no que diz respeito ao fornecimento de energia para a mobilidade automóvel. 28% dos carros produzidos na época funcionavam apenas a eletricidade, só nos Estados Unidos da América. No ano de 1908, Henry Ford introduz a produção em massa do Modelo T, totalmente a gasolina,

tendo tido um efeito profundo no mercado automóvel em geral. Este tipo de veículos acabaram por dominar o mercado até ao século XXI [9].

A partir dos anos 60, passou a haver um maior interesse nos veículos elétricos devido à recomendação por parte do congresso americano no uso de veículos elétricos para diminuição da poluição provocada por veículos de combustão interna. Esse interesse continuou a existir até aos dias de hoje, com o lançamento de diversos veículos híbridos e elétricos – Toyota Prius, Honda's EV Plus, GM's EV1, Ford's Ranger pickup EV, Nissan's Altra EV, Chevy's S-10 EV, Toyota's RAV4 EV, Tesla Roadster, Nissan LEAF, Chevrolet Volt, Mitsubishi i MiEV. BMW i3, Tesla Model 3 e muitos outros. A figura 1 mostra um veículo BMW i3 a ser carregado na via pública. Nos dias de hoje, acredita-se que a Tesla seja a empresa automóvel mais presente no mercado, no que diz respeito a carros totalmente elétricos [9].



Figura 1 – Veículo elétrico i3 a ser carregado na via pública [11]

Existem vários tipos de veículos híbridos e elétricos [12]:

- Híbridos convencionais, HEV's (*Hybrid Electric Vehicles*), em que a energia elétrica gerada provém das travagens, onde a energia cinética é convertida em eletricidade, estando dependente sempre de motores de combustão interna a gasolina ou gasóleo para funcionamento normal;
- Híbridos com possibilidade de realimentação à rede elétrica, PHEV's (*Plug-in Hybrid Electric Vehicles*), sendo estes similares aos anteriores, mas com uma maior capacidade de autonomia;
- Veículos totalmente elétricos alimentados por bateria, BEV's (*Battery Electric Vehicles*), que podem ser carregados na rede elétrica, tendo hoje em dia uma autonomia de até 320 km;
- Veículos elétricos de células de combustível, FCEV's (*Fuel Cell Electric Vehicles*), que têm uma forma de armazenamento sob a forma de tanques de hidrogénio, com o auxílio de eletrólise da água para obtenção de energia elétrica.

2.3 Dinâmica e controle do veículo

As modelações dinâmicas de veículos de escala normal são feitas fixando um sistema de coordenadas ao centro de gravidade. O modelo é simplificado, assumindo que cada eixo partilha do mesmo ângulo de direção e que cada roda vai produzir as mesmas forças provenientes dos ângulos de direção. De uma forma fundamental, os modelos de um veículo de escala normal são baseados num modelo resultante destas combinações, conhecido como o modelo linear da Bicicleta [13], representado na figura 2. Tendo em consideração o modelo linear da Bicicleta e de forma a linearizar o sistema, este modelo assume que [14]:

- A Largura da pista é desprezada;
- Os pneus funcionam dentro de um intervalo linear;
- A velocidade longitudinal é constante;
- Os efeitos aerodinâmicos são desconsiderados;
- Geometria da suspensão é negligenciada.

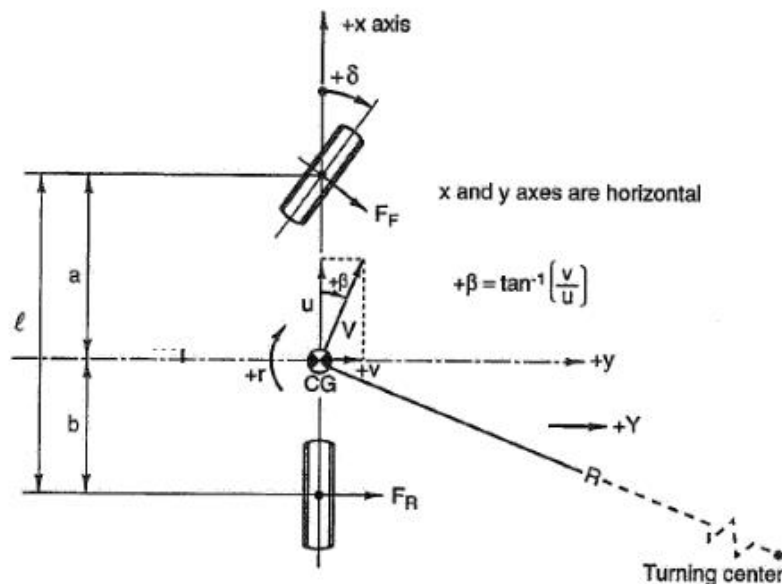


Figura 2 – Modelo linear da bicicleta [15]

Este modelo simplifica um veículo de quatro rodas, tornando o sistema reduzido a duas rodas, com forças representadas no eixo dianteiro (roda da frente da bicicleta) e forças representadas no eixo traseiro (roda traseira da bicicleta) [16].

No entanto, é importante referir que este modelo só é válido em manobras com baixa aceleração lateral, pois a carga de um veículo tem um efeito importante no comportamento de um veículo em andamento [14].

Quando se fala em modelação automóvel e dinâmica de pneus, é importante referir que a interação entre os pneus de um veículo e a superfície da estrada é altamente não-linear. Para isso, usa-se o modelo de Dugoff em que a força perpendicular do pneu ao plano das rodas é proporcional ao ângulo de deslizamento, como podemos ver representado na figura 3. Esta aproximação linear é suficiente para ângulos pequenos.

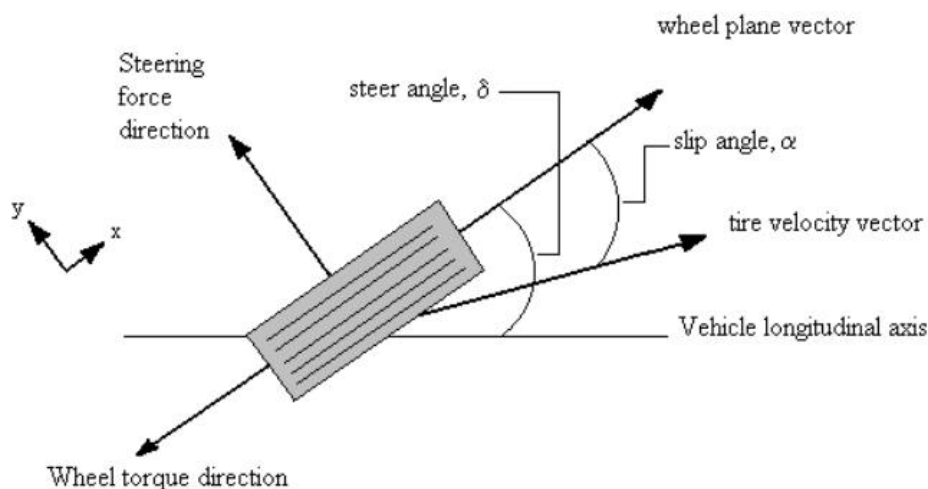


Figura 3 – Ângulo de deslizamento dos pneus [17]

Estes modelos são importantes de referir, nomeadamente em veículos elétricos com quatro rodas a atuarem independentemente, onde o binário, aceleração e travagem são características que atuam de forma independente, fornecendo flexibilidade para respostas mais precisas [18].

2.4 Controlo do veículo

Quando se fala de controlo do veículo, é importante fazer uma introdução acerca da história da evolução da segurança automóvel, para fazer um enquadramento nos sistemas que atualmente fazem parte para controlo dos veículos.

Desde o primeiro acidente automóvel que aconteceu no ano de 1869, que se começou de uma forma muito gradual a dar mais atenção a problemas de segurança na área automóvel. A introdução de travões hidráulicos, vidros de segurança e posteriormente travões de disco foram algumas das primeiras ações a serem tomadas até aos anos 50, no que diz respeito a segurança automóvel.

A marca de automóvel Volvo introduziu encostos de cabeça e cintos de segurança, passando a ser estas medidas standard em todos os carros volvo [19].

Com o lançamento do ABS eletrónico da Bosch em 1978 nos modelos mais altos da Mercedes, até ao airbag para o condutor no sistema SRS e o sistema lateral de airbags em 1994 a serem lançados pela Volvo, verificou-se uma evolução muito mais evidente no que diz respeito à segurança automóvel. O sistema eletrónico de controlo de estabilidade apareceu em 1995 com a parceria entre a Mercedes e a Bosch e em 1996 nasceu a organização euro NCAP, com os primeiros resultados de testes de impacto a darem o mérito ao modelo S40 da Volvo, destacando-se esta como uma marca exímia no que diz respeito à segurança automóvel [20]. Mais tarde surgem sistemas tecnologicamente mais avançados, como sistemas de monitorização de afastamento de faixa, ângulos cegos, travagens automáticas, desvios automáticos e muitos outros.

De seguida irá ser dada uma pequena introdução ao diferencial (mecânico e eletrónico), ao sistema de controlo de tração para travagens e acelerações (ABS e TCS, respetivamente) e ao sistema eletrónico de controlo de estabilidade.

Diferencial mecânico e eletrônico

Sendo este um componente composto por engrenagens, localizado no centro do eixo que inclui as rodas motrizes, tem como função distribuir o binário gerado pelo motor na roda que tem menos oposição ao movimento, tendo assim as rodas uma velocidade diferente em situações em que o veículo está em curva. A figura 4 mostra o comportamento das rodas em curva com o diferencial mecânico.

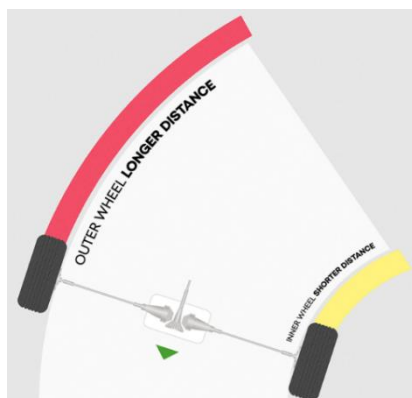


Figura 4 – Comportamento das rodas em curva com o diferencial mecânico [21]

Quando o veículo está em curva, as rodas vão descrever trajetórias com raios diferentes. Para isso o diferencial distribui uniformemente o binário em linha reta e em curva permite uma distribuição equilibrada [22].

Para veículos com quatro motores elétricos, o sistema é independente e controlado por software, não havendo limitações de binários e a resposta é muito mais rápida. Outra das grandes vantagens é a simplicidade dos componentes mecânicos, visto não haver necessidade de transmissão e engrenagens.

Sistemas de controlo de tração

No que diz respeito a sistemas de controlo de tração, existe o ABS para travagens (Anti-lock Braking System) e o TCS para acelerações (Traction Control System). Ambos os sistemas recorrem a sensores e a microcontroladores, sendo que no caso do ABS, a correção é feita eletronicamente, onde se diminui o desliz da roda e recupera-se tração, mantendo assim o controle do veículo durante a travagem. No caso do TCS, como pode ser visto na figura 5, esta pode ser aplicada a travagem para reduzir o desliz da roda ou o controlador, por outro lado, pode reduzir a potência do motor [23].

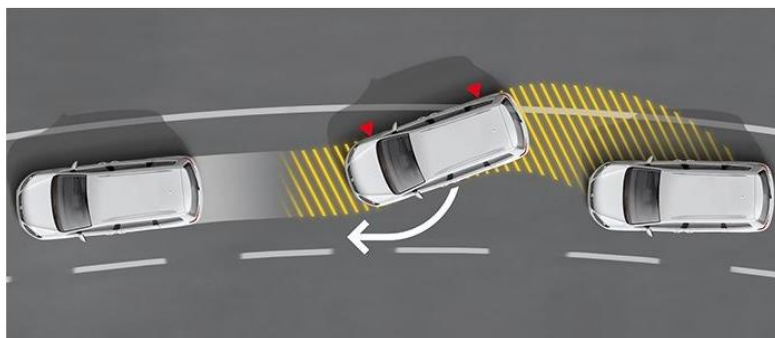


Figura 5 – Sistema de controlo de tração (TCS) [24]

Sistema Eletrónico de Controlo de Estabilidade

A função deste sistema é a verificar se o veículo se encontra em subviragem ou sobreviragem e aplicar a devida correção, sendo aplicada intensidade de travagem independente em cada uma das quatro rodas ou sendo diminuído o binário proveniente do motor, desta forma tentando estabilizar o mesmo dentro do possível [18]. A figura 6 mostra graficamente como o ESP se comporta quando ativo.

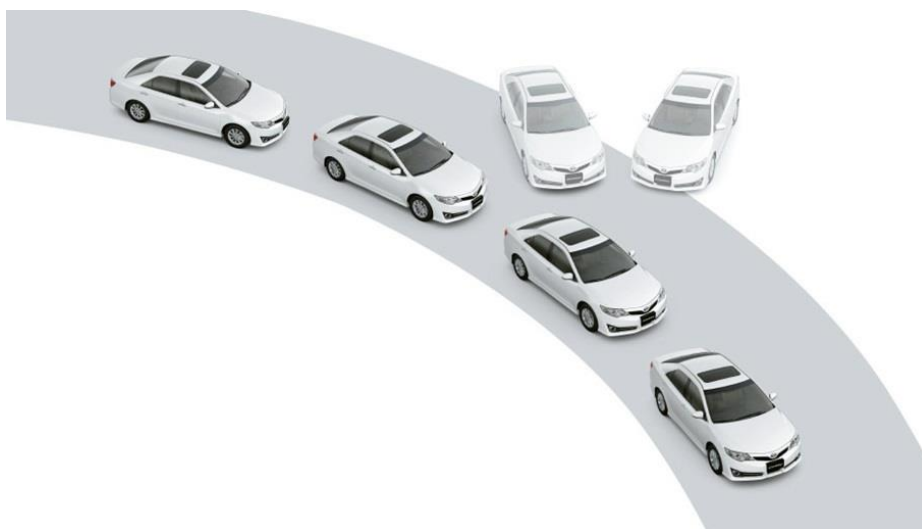


Figura 6 – Sistema de controlo eletrónico de estabilidade (ESP) [25]

2.5 Veículo elétrico com tração integral

Os primeiros veículos com tração integral começaram a ser desenvolvidos no início do século XX nos Estados Unidos da América. Só passado quase cem anos é que começaram a ser produzidos em série. Em 1970 foi lançado o primeiro Range Rover, considerado o primeiro carro com tração integral, tendo sido este um modelo muito bem recebido pelo público [26]. Por volta do ano de 1980, também a Audi criou dois modelos *Quattro*. Apesar de na via comercial o seu desenvolvimento ter sido tardio, na via militar estes tipos de veículos já eram usados com muita frequência, como é o caso da empresa 4WD que em 1912 já começava a produzir veículos militares com tração integral, e mais tarde Jeeps produzidos pela American Bantam Car Company. O seu contrato foi passado para a Ford e a Willys Overland, devido aos seus preços mais competitivos [27].

Curiosamente, o primeiro veículo elétrico a usar um sistema de tração integral foi criado em 1899 por Ferdinand Porsche, com um motor elétrico em cada roda. Este modelo encontra-se em exposição no Dutch National Automobile Museum. Só mais tarde, modelos elétricos de tração integral foram usados nos veículos lunares pela NASA, onde cada roda teria o seu próprio motor. Só foram construídos três modelos e usados nas missões Apollo 15, 16 e 17, continuando estes ainda na Lua [26].

Nos dias de hoje existem já planeados vários modelos elétricos com tração integral para venda ao público, como o BMW i8 Roadster, Volvo Polestar 1, Audi E-tron Quattro, Tesla Model 3 e muitos outros. Apesar destes avanços tecnológicos, nenhum deles está previsto ter um motor adaptado a cada roda [28].

Os motores elétricos embutidos em cada uma das quatro rodas são uma tecnologia que apesar de não ser novidade, providenciam atuação rápida e precisa em relação ao binário [29]. Geralmente são caracterizados por serem sistemas sob a forma de módulos, onde está o pneu, roda, suspensão, sistema de travagem e de arrefecimento e o próprio motor elétrico. Diversas empresas como a Schaeffler, Siemens e Protean Electric desenvolveram versões destes tipos de motores, assim como carros conceptuais para mostras de tecnologias. Podendo potenciar quase 96% da energia providenciada, estes motores são caracterizados por estarem localizados onde a potência gerada é mais necessária, havendo quase perdas de transmissão nulas [30]. A Universidade de Swinburne criou um carro elétrico com quatro rodas com motores embutidos, como representado na figura 7.



Figura 7 – Carro elétrico com quatro rodas com motores elétricos embutidos, em progresso na Universidade de Swinburne [31]

Apesar das inúmeras vantagens, como a construção do motor mais simples que os de usuais de combustão interna, baixo peso, fácil arrefecimento, alta densidade de binário e alta eficiência no que diz respeito à transmissão e à sua operabilidade [32], este sistema ainda não é comercializado, pois não existe ainda a tecnologia nem o investimento necessário para comercializar e produzir em larga escala este tipo de veículos, pois também seria necessário alterar todo um design e criar um conceito completamente novo [33].

Para melhor controlo de potência nos motores e para que não haja perdas ocorridas devido às quedas de tensão, utilizam-se sistemas de modelação por largura de pulso, ou em inglês – PWM (Pulse-Width Modulation). Deste modo, os transístores são ligados e desligados por meio desta modulação, garantindo uma tensão sem perdas [34].

2.6 PID – Algoritmo para controlo de veículos elétricos

O Sistema PID é um sistema de controlo denominado por *Proportional Integral Derivative*, que tem como função eliminar qualquer erro na posição longitudinal do carro [35]. Este sistema de controlo providencia de uma forma genérica e eficiente soluções para problemas na vida real [36].

Este sistema foi inventado em 1910 e desde então tem vindo a ser implementado em sistemas automáticos com o intuito de simplificar e tornar mais eficiente as soluções para problemas de controlo em veículos [36].

Sendo este conhecido como um controlador de “três termos”, este pode ser escrito sob a seguinte forma:

$$G(s) = Kp + K_I \frac{1}{s} + K_D s \quad (2.1)$$

Onde Kp é o ganho proporcional, K_I é o ganho integral, K_D é o ganho derivativo e S é a frequência complexa, sendo possível a sua aplicação em diversas áreas.

Contudo, este método tem algumas limitações, sendo baseado em parâmetros constantes. Dessa forma, não tem o conhecimento direto do processo em questão para o qual está a ser aplicado. O seu resultado é baseado num compromisso entre todos os parâmetros.

Este algoritmo no caso desta investigação, pode desempenhar um papel importante no controlo de velocidade dos quatro motores. Ele desempenha uma função essencial, pois permite que outros sistemas de controlo possam ser implementados, visto dependerem do controlo e precisão da velocidade de cada roda.

2.7 Modelação de veículos em pequena escala

Modelações de veículos em pequena escala são frequentemente usados em contexto de aproximações de veículos de larga escala. Neste capítulo, vão ser introduzidos conceitos e princípios que permitem fazer semelhanças e aproximações de veículos de diferentes escalas, no que diz respeito a vários fatores como tração, direção, segurança, travagens e muitos outros fatores.

2.7.1 Teorema de buckingham-pi

Em Truesdell [37], o Teorema de Buckingham-Pi é apresentado como sendo um teorema que permite que uma equação com n argumentos e m dimensões, possa ser expressa com uma relação de n com m , independentemente das dimensões em questão. Apesar de este teorema ser uma proposição matemática, este é frequentemente usado para garantia da semelhança dinâmica entre veículos de diferentes escalas. Além disso, este método é usado extensivamente na condução de testes experimentais [14]. Este teorema é baseado no conceito de homogeneidade dimensional, inicialmente estudado por Fourier. Este conceito afirma que todos os termos de uma expressão matemática devem ter a mesma dimensão, portanto se assumirmos que um sistema pode ser definido por variáveis, conforme representado na seguinte expressão:

$$u_1 = f(u_1, u_2, \dots, u_k) \quad (2.2)$$

Este teorema mostra que o número de termos Pi é menor que as variáveis originais [14].

$$\Pi_1 = f(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{k-r}) \quad (2.3)$$

A variável espaço é reduzida por r , o mínimo de variáveis base necessárias para definir todas as variáveis dentro do sistema. O único requisito é que as dimensões base não possam ser combinadas para formar um grupo adimensional, designando-se por independência dimensional.

Portanto, o teorema de Buckingham Pi afirma que o número necessário de termos PI é menor que as variáveis originais. As variáveis resultantes para uma semelhança dinâmica entre o veículo de pequenas dimensões e um de grandes dimensões, são as distâncias dos eixos ao centro de gravidade, coeficientes de deslizamentos das rodas e o momento de inércia no eixo z. O procedimento para a determinação das variáveis necessárias para uma semelhança dinâmica será apresentado do ponto seguinte.

2.7.2 Semelhança dinâmica

Um dos aspectos mais importantes na análise dimensional é o conceito de semelhança, onde se dois sistemas podem ser definidos pelas mesmas variáveis e operar nas mesmas condições, então são sistemas semelhantes. O melhor exemplo é o sistema de modelos de pequena escala que é usado em veículos, onde diversas observações podem ser obtidas simplesmente observando o modelo de pequena escala [14].

Ao desenvolver este tipo de testes, há três fatores de escala que devem ser considerados [38]:

- Fatores geométricos: comprimento, escala;
- Fatores dinâmicos: força;
- Fatores cinemáticos: velocidade ou aceleração.

Naturalmente, não devem ser desconsideradas nenhuma variáveis, pois isso poderá resultar numa observação falsa no que diz respeito aos fatores de escala.

Existe um método que através de uma abordagem sistemática determina a quantidade e forma adequada dos parâmetros pi necessários, que é o das variáveis repetidas [38].

Este método consiste em cinco passos:

1. Identificação de todas as variáveis que afetam o sistema;
2. Escolha de um grupo base de dimensões;
3. Determinação do número de grupos PI;
4. Seleção do número de variáveis repetidas, que são usadas para definir os grupos PI;
5. Cálculo dos grupos PI.

Com base em [14], as variáveis resumidas para a semelhança dinâmica de um veículo de pequena escala são:

$$\Pi_1 = \frac{a}{L}, \quad \Pi_2 = \frac{b}{L}, \quad \Pi_3 = \frac{C_{af}L}{MV_x^2}, \quad \Pi_4 = \frac{C_{at}L}{MV_x^2}, \quad \Pi_5 = \frac{J_z}{ML^2} \quad (2.4)$$

a: distância do centro de massa do veículo ao eixo da frente;

b: Distância do centro de massa do veículo ao eixo de trás;

L: Distância entre eixos;

M: Massa do veículo;

V_x : Velocidade longitudinal do veículo;

C_{af} : Coeficiente de rigidez no eixo frontal;

C_{at} : Coeficiente de rigidez no eixo traseiro;

J_z : Momento de inércia do veículo segundo o eixo Z.

2.7.3 Veículos à escala

A literatura existente documenta desenvolvimento de testes usados em plataformas físicas. As mais ativas foram a Universidade de Urbana-Champaign com o seu *Illinois Roadway Simulator (IRS)* [39], como representado na figura 8 e a Universidade do Estado de Penn com o sistema PURRS (*Pennsylvania University Rolling Roadway Simulator*) [16].

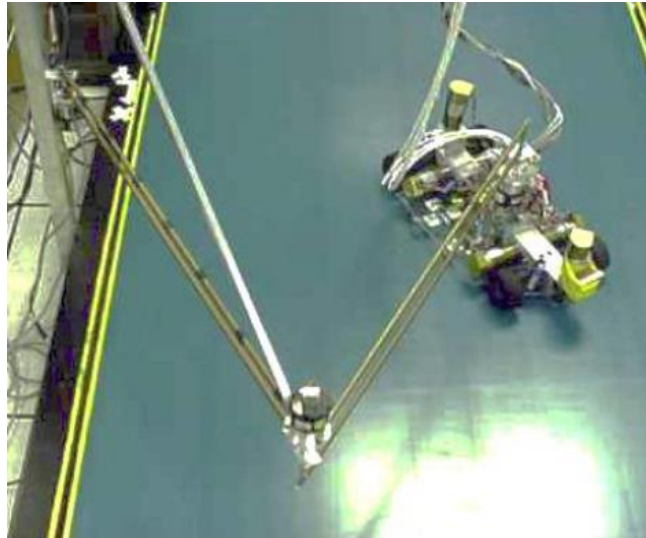


Figura 8 – *Illinois Roadway Simulator (IRS)* [14]

O sistema IRS é baseado num sistema com uma plataforma com uma passadeira rolante, onde os testes são repetitivos e feitos da mesma maneira, sendo que a área usada pela plataforma é reduzida. Neste sistema são usados três veículos de teste: veículos com tração traseira e direção dianteira, tração às quatro rodas e direção nos dois eixos e um outro com os quatro motores independentes. Existe um braço mecânico que está sempre ligado ao veículo, condicionando as possíveis manobras [39].

No sistema PURRS, representado na figura 9, é possível obter experimentalmente parâmetros fundamentais como o centro de massa, momento de inércia angular e coeficiente de rigidez lateral.

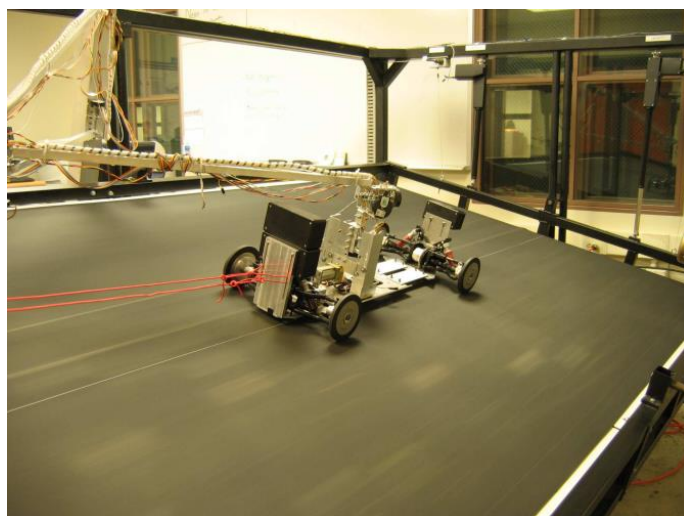


Figura 9 – *Pennsylvania University Rolling Roadway Simulator (PURRS)* [16]

O efeito de atraso dinâmico do pneu também é aferido, estabelecendo que existe uma geração de força lateral. Neste teste é determinado que a dinâmica é semelhante aos veículos reais para manobras de diferentes frequências se os ângulos de direção forem pequenos os pneus comportam-se de maneira diferente entre veículos de diferentes escalas devido ao efeito de atraso dinâmico, pois as deformações são diferentes entre pneus de diferentes tamanhos [16].

2.8 Baterias para carros elétricos

Uma Bateria é um dispositivo que transforma em eletricidade a energia por meio de uma reação química, devido a uma ou mais células eletroquímicas. No caso das baterias dos carros elétricos, a eletricidade é providenciada por meio de linhas de energia até um carregador de baterias. Este vai carregar uma bateria de íons de Lítio que vai armazenar a energia a bordo do veículo para transformação em energia cinética [40].

O sistema de funcionamento deste tipo de veículos é similar aos carros de combustão interna: uma chave ou um sistema numérico ligam o painel de instrumentos e o ECM – Electronic Control Module e por via do acelerador, um sinal é enviado para o ECM com uma tensão e intensidade proporcional à pressão exercida no acelerador. Por sua vez, o motor vai aplicar binário nas rodas. Este binário é sentido mais intensamente do que num carro de combustão interna porque as curvas de potência/binário são muito maiores neste tipo de veículos [41].

Apesar de as baterias para carros elétricos ainda não estarem tão desenvolvidas como os sistemas dos carros de combustão interna ou como os sistemas de células de combustíveis, já está provado que estes sistemas de baterias são muito eficientes para pequenas distâncias e ambientes citadinos, como pode ser visto na figura 10 [42].

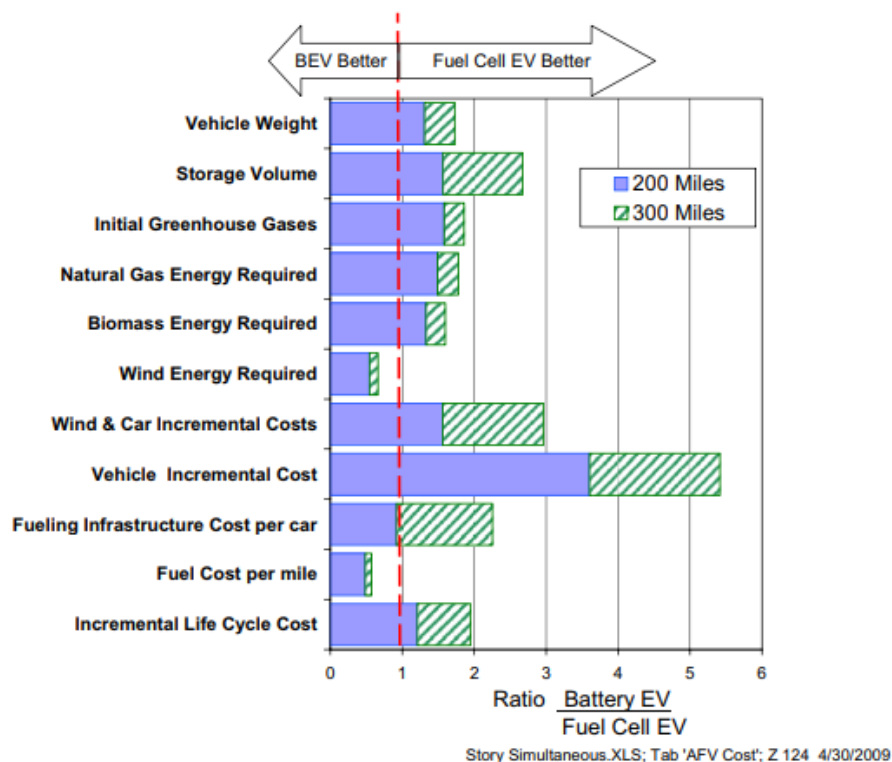


Figura 10 – Relação entre Baterias de Veículos Elétricos Células de Hidrogénio para 320 e 480 km [42]

Segundo Sandeep Dhameja, baterias do tipo Li-Ion têm um grande potencial de energia específica e hoje em dia já existem sistemas de carregamento rápido. Existem outros tipos de baterias, como as de Chumbo e Ácido, as de Níquel-Cádmio, Polímero de Lítio e as Células de Hidrogénio, sendo que estas últimas são consideradas as mais eficientes no que diz respeito a longas distâncias [41]. No entanto, verifica-se desvantagens neste tipo de veículos devido ao seu excessivo peso, longos tempos de carregamento – característica que tem vindo a ser minimizada com os carregamentos rápidos - e pouca durabilidade em relação aos seus homólogos de combustão interna [42].

3. Material e Métodos

Esta secção tem como propósito a descrição de todos os materiais e componentes utilizados na elaboração deste projeto, os métodos utilizados para a projeção e criação do protótipo, assim como os testes para assegurar a viabilidade e garantia dos possíveis resultados que o protótipo poderá fornecer.

São descritos todos os passos para o estabelecimento de um modelo do veículo em pequena escala. O processo inicia com a esquematização e seleção dos componentes elétricos e mecânicos, criação de uma arquitetura de controlo composta por hardware e software, parametrização para adaptação à escala, criação de uma rotina de testes e avaliação do modelo criado como plataforma de testes.

Este trabalho resulta da continuação da tese de dissertação “Segurança automóvel: Sistemas de apoio à condução” [43], em que foi elaborado um modelo matemático com base no modelo de dinâmica longitudinal e lateral, no modelo de dinâmica planar de um veículo com dois eixos e tração às quatro rodas, no modelo do motor elétrico e o no modelo da interação entre o pneu e a estrada. Destes modelos resultam várias variáveis e parâmetros que vão caracterizar o modelo do veículo em pequena escala a desenvolver. São apresentadas na tabela 1 todas as grandezas físicas envolvidas no sistema e que serão obtidas durante a elaboração do veículo.

Tabela 1 – Nomenclatura das variáveis e parâmetros do modelo do veículo

Símbolo	Grandeza física	Unidade
a	Distância do centro de massa do veículo ao eixo da frente	m
b	Distância do centro de massa do veículo ao eixo de trás	m
W	Distância entre rodas de cada eixo	m
L	Distância entre eixos	m
r	Raio da roda	m
V_x	Velocidade longitudinal do veículo	m/s
M	Massa do veículo	Kg
$F_z f$	Força exercida pelo eixo frontal	Kgf
$F_z t$	Força exercida pelo eixo traseiro	Kgf
J_z	Momento de inércia do veículo segundo o eixo z	Kg.m ²
J_w	Momento de inércia da roda	Kg.m ²
J_m	Momento de inércia do motor elétrico	Kg.m ²
D_m	Coeficiente de atrito dinâmico do motor elétrico	N.m/(rad/s)

K_m	Constante de ganho de torque do motor elétrico	N.m/A
K_g	Constante de ganho da força contraelectromotriz do motor elétrico	V/(rad/s)
R_a	Resistência da armadura do motor elétrico	Ω
L_a	Indutância da armadura do motor elétrico	H
V_a	Tensão aos terminais do motor elétrico	V
$V_{a_{max}}$	Valor máximo da tensão de operação do motor elétrico	V
P_{max}	Potência máxima do motor elétrico	W
A_f	Área frontal do veículo	m ²
C_d	Coefficiente aerodinâmico do veículo	Adimensional
N	Razão da caixa de velocidades	Adimensional
C_{af}	Coefficiente de rigidez no eixo frontal	Adimensional
C_{at}	Coefficiente de rigidez no eixo traseiro	Adimensional

3.1 Estabelecimento de um modelo em pequena escala

Para o desenvolvimento de um veículo de pequena escala foi necessário a criação de uma metodologia que conduzisse à sua construção. Assim sendo, foi necessário identificar as características e os componentes que são mais importantes para o seu funcionamento, não perdendo informações importantes e não tornando o sistema muito complexo.

Devido à inexistência no mercado de um veículo de pequenas dimensões com motores embutidos nas quatro rodas que pudesse servir de base para o desenvolvimento do protótipo, foi tomada a decisão de construir e selecionar todos os componentes e mecanismos de raiz.

O objetivo principal é a criação de um protótipo de um veículo à escala com semelhanças de um veículo real. A informação que pode ser obtida a partir de modelos de escala inferior é muito útil, pois permite a conversão para veículos à escala real [35]. Além disso, os veículos à escala são muito mais simples e têm custos incomparavelmente inferiores aos de um veículo à larga escala [6]. Partindo deste princípio e devido ao facto de já existirem diversos modelos no mercado de pequena escala com os aspetos físicos pretendidos, baseamo-nos na seleção de um modelo à escala de um veículo telecomandado que servisse de referência nas características estruturais a desenvolver. Através deste modelo é possível verificar que para além dos aspetos estruturais, existem aspetos mecânicos e elétricos a tomar em conta. A nível mecânico foram considerados dois sistemas:

- O primeiro é o sistema de tração independente em cada roda, que engloba três componentes: roda, motor e um sensor de velocidade;
- O segundo é a direção do veículo sobre as rodas dianteiras, que neste caso é composta por um servomotor e um conjunto de engrenagens.

Ao nível elétrico todos os elementos, exceto as engrenagens e rodas, são alimentados por uma tensão contínua, através de um grupo composto por bateria e regulador de tensão. Por forma a simplificar a interligação dos vários componentes, foi escolhida uma única tensão de funcionamento: 5VDC. Outro dos motivos desta opção foi por ser uma das opções mais usadas em

microcontroladores e sensores e não necessita de uma bateria com elevado número de células. Desse modo, o controlo do hardware é feito a partir de um microcontrolador com a capacidade de comunicar através dos vários protocolos e sinais. Os motores DC e o servo motor são operados através da variação de tensão resultante da codificação do PWM a partir do controlador de motores.

O diagrama da figura 11 explica como os componentes estão relacionados entre si, em termos de ligações mecânicas (linha dupla), elétricas (linha tracejada) e comunicações (linha contínua).

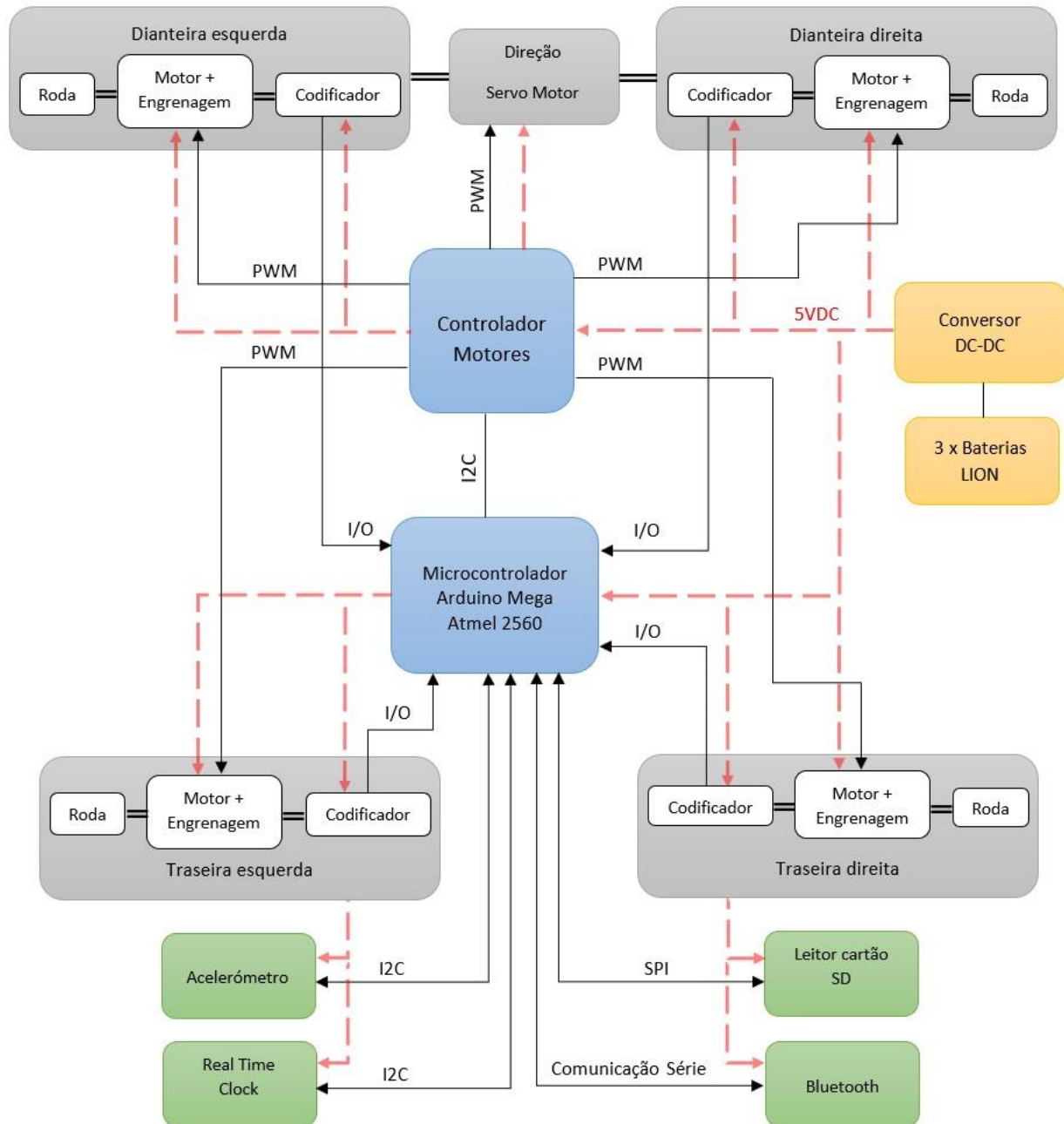


Figura 11 – Diagrama geral de todos os componentes que fazem parte do veículo protótipo a desenvolver

O passo seguinte será a projeção de um modelo virtual num software de modelação 3D. Neste caso foi usado o *Autodesk Inventor*, para uma melhor compreensão da organização dos componentes e percepção do espaço disponível para futuros ajustes. Com este software, a criação do modelo torna-se simples, visto ser usado na montagem dos vários componentes em formato 3D fornecido pelos fabricantes. Este modelo será a primeira vez que os componentes seleccionados estão reunidos em termos de volume, estando patente todos os aspetos estruturais, mecânicos e elétricos de um veículo em pequena escala.

Os componentes físicos do veículo precisam de ser controlados e funcionar de forma sincronizada, surgindo a necessidade de um sistema de controlo [14]. Desta arquitetura faz parte um *firmware* desenvolvido à medida para gestão de todos os componentes.

De seguida, vai ser descrita de forma pormenorizada todos os componentes escolhidos e respetivas características.

3.1.1 Escolha de um modelo automóvel e teste de consistência à escala

Para o início desta construção, houve a necessidade de obter uma base para alavancar todo o processo. Após algumas pesquisas de veículos de pequena escala, chegou-se à conclusão de que a melhor forma seria o estudo de modelos à escala de veículos telecomandados destinados à diversão. Apesar dos aspetos mecânicos e elétricos não irem de encontro às características pretendidas para o estudo deste projeto, existem muitos outros aspetos relevantes a ter em conta. Passo então a explorar passo a passo quais são as características.

O veículo seleccionado e que melhor se enquadrava para a elaboração deste trabalho foi um veículo telecomandado, da marca NIKKO [44], à escala de 1/14, como está representado na figura 12.

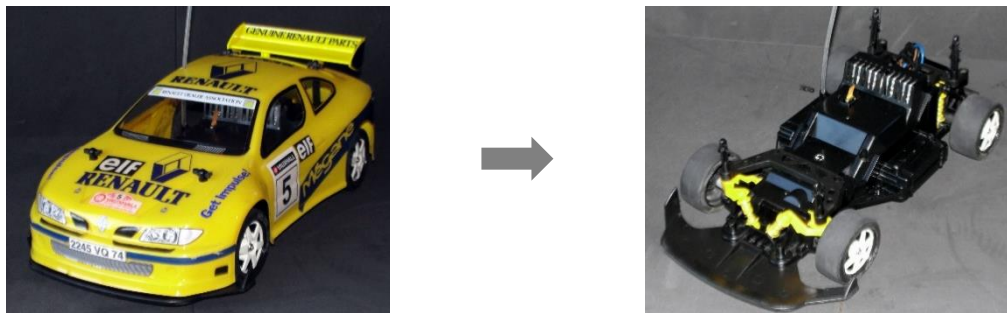


Figura 12 – Renault Megane Coupé de 1999 telecomandado à escala de 1/14

Tendo em conta o chassis do modelo escolhido, foram efetuadas medições aos eixos e dimensões do veículo.

Foi efetuado um teste de coerência para o veículo seleccionado, através de uma tabela comparativa entre os dados fornecidos pelo fabricante do veículo real, a relação da escala fornecida pelo fabricante da réplica e as medições da réplica que servirá como base para a construção do chassis, representada na tabela 2.

Tabela 2 – Tabela comparativa de diversas características dimensionais entre o veículo real, à escala, réplica e o respetivo desvio

Tipo de Medição	Veículo Real (mm)	Veículo à escala 1/4 (mm)	Réplica (mm)	Desvio (%)
Distancia entre eixos	2469	176	180	2.2
Distancia entre rodas	1430	102	105	2.9
Altura ao solo	119	8.5	10	15
Dimensão da roda	632	45	50	10
Comprimento	3970	283.6	300	5.5
Largura	1699	121.4	150	19

3.1.2 Aspetos estruturais/chassis

A modelação do aspeto estrutural de um veículo torna-se mais simples se aplicarmos a base obtida no ponto anterior. Através deste modelo é possível desenhar a forma do futuro chassis, visto termos o comprimento, largura e as distâncias entre rodas e eixos. A dimensão da roda vai ser calculada mais tarde, quando for escolhida a caixa desmultiplicadora do motor elétrico. A dimensão da roda e as rotações finais do grupo motor e caixa vão definir a velocidade máxima e a altura ao solo do protótipo.

O passo seguinte foi a seleção do material para a criação do chassis da plataforma. A escolha do material é de elevada importância pois trata-se de uma construção manual, recorrendo a ferramentas de corte simples. O material deverá ser de fácil modelação, não ignorando a falta de rigidez. Outro indicador de elevada relevância é o peso, pois pode determinar o sucesso da similaridade com os veículos reais, ou seja, quando em défice pode ser adicionado, mas o inverso já não é possível. Este fator será abordado com mais pormenor mais à frente. Por fim, o indicador custo que será em função do orçamento do projeto.

Com base nestes requisitos e tendo em conta os recursos e meios disponíveis para a construção do veículo, foram selecionados quatro materiais que foram classificados através de quatro indicadores: facilidade de modelação, rigidez, peso e custo, como representado na tabela 3.

Tabela 3 – Comparativo de materiais em relação ao peso, rigidez, facilidade de modelação e custos

Material	Peso	Rigidez	Facilidade de modelação	Custo
Balsa	Excelente	Baixo	Excelente	Baixo
Aglomerado	Bom	Média	Bom	Baixo
Alumínio	Bom	Bom	Baixo	Alto
Fibra de carbono	Excelente	Excelente	Baixo	Alto

A escolha mais equilibrada para a construção do chassis foi o aglomerado de fibras de eucalipto de 3mm. Este material permite facilidade de modelação com ferramentas de corte, furação e polimento simples e acessíveis, peso reduzido e custos reduzidos.

No caso em que o modelo de pequena escala devesse obedecer a um maior rigor em termos de medidas e com um orçamento superior, o material de primeira eleição seria o alumínio. O corte do chassis teria de ser executado recorrendo a tecnologia CNC.

Escolhido o material e tendo a forma e as dimensões do protótipo definidos, já é possível simular em 3D, representado na figura 13, um chassis para uma melhor noção do espaço disponível e poder avançar com um estudo de seleção dos componentes em falta. Este estudo contempla a organização dos equipamentos, criação de mecanismos de ligação entre eles e formas de fixação à estrutura.

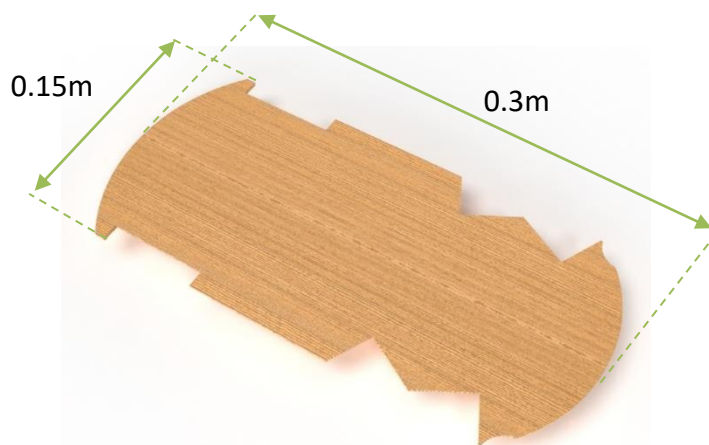


Figura 13 – Modelo em 3D do chassis, a partir do veículo de pequena escala

Na plataforma desenvolvida será necessário organizar o espaço e escolha da posição ideal para o posicionamento de todos os componentes.

3.1.3 Roda, motor e sensor de velocidade

Um dos objetivos da dissertação é a criação de um veículo com tração independente às quatro rodas. Esta tipologia de veículo é composta por quatro motores elétricos embutidos em cada roda que incluem o pneu, suspensão, sistema de travagem e o sistema de arrefecimento. Esta forma de tração tem várias vantagens para a construção do protótipo, tais como: não necessitar de diferenciais nos eixos e outros componentes mecânicos complexos e todas as rodas possuem componentes com as mesmas características.

Equipar um chassis com quatro sistemas de força eletromotriz implica: calcular o espaço disponível, calcular a dimensão da roda, seleção do motor, cálculo da relação da engrenagem do motor, integração do sensor de velocidade com o motor, pesquisa no mercado por componentes que respeitem os requisitos anteriores e desenvolvimento de sistema de fixação das rodas traseiras e frontais direcionáveis para posteriormente incluir o sistema de direção.

Devido à elevada velocidade angular que um motor elétrico pode atingir, surge a necessidade de a reduzir para se tornar compatível com a velocidade de operação de um veículo e pela necessidade de um aumento do torque disponível no momento de arranque. Para solucionar este problema os fabricantes incluem nos motores engrenagens desmultiplicadoras de velocidade, o que conforme

descrito em [45], a relação da engrenagem (N) é determinada pelo rácio entre a velocidade angular de entrada W_e e a de saída W_s :

$$W_e = W_s \cdot N \quad (3.1)$$

O torque do motor pode ser calculado da mesma forma, em que o torque de entrada é representado por T_e o de saída por T_s :

$$T_e = T_s \cdot N \quad (3.2)$$

A partir da velocidade angular de saída da engrenagem do motor e o raio da roda R pode ser calculada a velocidade longitudinal V_x , fator essencial na seleção do motor.

$$V_x = W_s \cdot R \quad (3.3)$$

O fabricante *Precision Microdrives* [46] produz micromotores com engrenagens que variam entre 5:1 a 1000:1, dimensões que se enquadram no espaço disponível do chassis, tensão de operação baixa, com veio em forma de D de 3mm compatível com vários diâmetros de rodas, permitindo a instalação de um sensor de corrente.

A seleção dos componentes que melhor se adaptam aos requisitos anteriormente mencionados foi feita através do distribuidor de material eletrónico *Pololu*. Esta empresa é sediada em Las Vegas, Nevada e fornece diversos produtos para a robótica.

Com base na tabela 1, a roda com dimensões mais próximas da réplica e compatível com o motor já referido é a *Pololu Wheel 60x8mm*, tem 60mm de diâmetro, 8mm de largura, pneu de silicone e compatível com o veio em forma de D de 3mm.

O motor DC selecionado e que se enquadra nos requisitos mencionados, é o *30:1 Micro Metal Gearmotor HP 6V with Extended Motor Shaft*, como representado na figura 14.

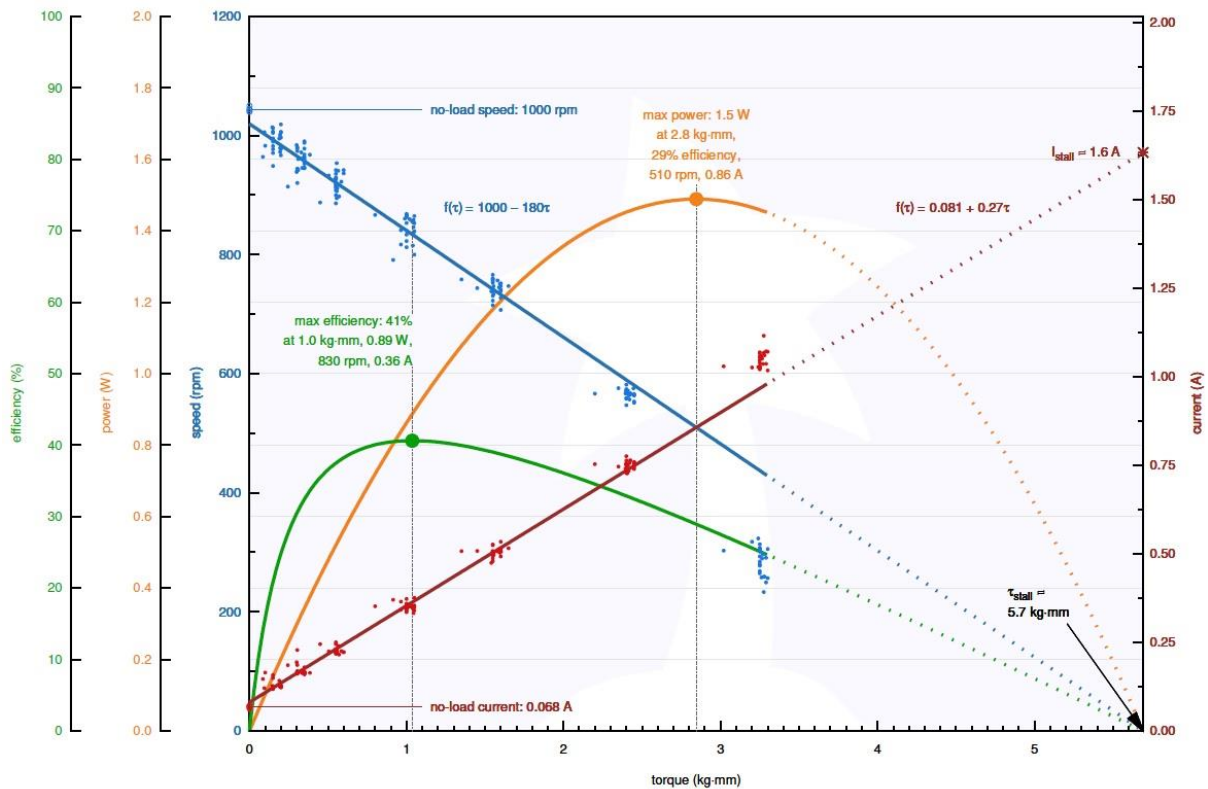


Figura 14 – Gráfico da eficiência, potência, velocidade e corrente do motor [47]

Analisando o gráfico do motor do fabricante da figura 14, pode-se calcular teoricamente a velocidade longitudinal através de (3.3) para a máxima eficiência e potência máxima.

- Máxima eficiência (41% a 1.0 *kg.mm* de torque, produzindo 830 RPM): 9.4 *km/h*

- Potencia máxima (1.5W a 2.8 *kg.mm* de torque, produzindo 510 RPM): 5.8 *km/h*

A escolha deste motor deve-se também à existência de um veio contrário ao veio da roda, que permite a instalação de um sensor de velocidade. Na figura 15 temos as perspectivas da instalação do sensor de velocidade no motor.



Figura 15 – Perspetivas da instalação do sensor de velocidade no motor

Com base nas especificações do fabricante do motor foram obtidos os parâmetros: resistência da armadura, indutância da armadura, tensão máxima de operação, potência máxima e razão da caixa de velocidades.

Os restantes valores foram obtidos com o auxílio da tese de dissertação anterior [43]. Devido à falta de informação do fornecedor do motor, os valores do momento de inércia J_m e do coeficiente de atrito dinâmico D_m usados, foram os da tabela 3.7 da tese anterior [43]. Da mesma fonte, a partir das equações 3.31 e 3.32 do modelo do motor elétrico, foram calculadas as constantes de ganho de torque K_m e de ganho da força contraelectromotriz K_g . Na tabela 4 temos os parâmetros dos motores elétricos DC.

Tabela 4 – Parâmetros dos motores elétricos DC

Parâmetro	Valor do parâmetro	Unidade
R_a	6	Ω
L_a	3.02×10^{-3}	H
$V_{a_{max}}$	6	V
P_{max}	1.5	W
N	29.86	Adimensional
J_m	1.62×10^{-6}	Kg.m ²
D_m	1.34×10^{-6}	N.m/(rad/s)
K_m	27.2×10^{-3}	N.m/A
K_g	1.18×10^{-3}	V/(rad/s)

O sensor de velocidade é um dispositivo que através do movimento de rotação de um disco magnético a uma determinada distância de dois sensores instalados na placa, produz impulsos digitais formado uma onda quadrada, podendo ser lida através de um microcontrolador. Os dois sensores estão instalados a 90° de desfasamento um do outro na placa e que através do “efeito de hall” produzem impulsos originados pelo disco magnético, como se pode observar na figura 16.



Figura 16 – Sensores de efeito de Hall U1 e U2 (TLE4946-2K)

O disco é composto por 6 polos e a placa por 2 sensores de efeito de hall, logo por cada rotação são produzidos 12 impulsos. Os sensores usados são os TLE4946-2K que operam numa gama de voltagem ampla (2,7V a 18V). Estes produzem sinais digitais através do campo magnético criado pela proximidade do polo do disco. A tensão de saída será igual à da alimentação devido à existência de uma resistência de *pull-up* com o valor de 10 k Ω . Para prevenir os casos em que o motor pare perto da zona de transição de impulso, os sensores estão dotados de comparadores de histerese. Na figura 17 estão representados os impulsos originados pelos polos do disco magnético.

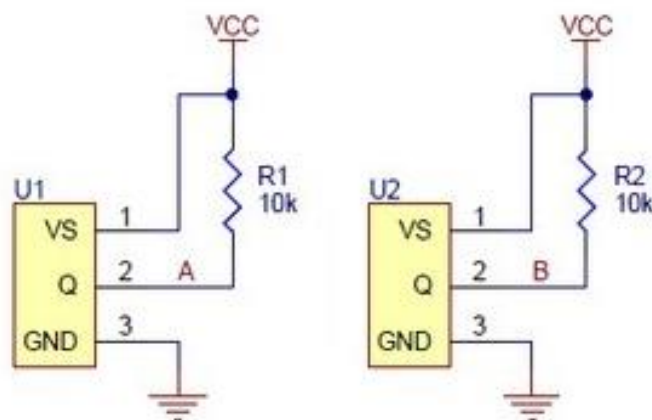


Figura 17 – Impulsos originados pelos polos do disco magnético

A instalação do grupo constituído por roda, motor com engrenagem e sensor de velocidade, é finalizada com a fixação das rodas traseiras e frontais direccionáveis. Os pontos de fixação do grupo são feitos através de um acessório que tem a forma do motor e furação para dois parafusos.

As rodas traseiras são fixas diretamente ao chassis, atendendo à distância entre rodas calculada anteriormente e ao alinhamento perpendicular ao chassis.

Nas rodas dianteiras o processo de fixação não pode ser o mesmo, sendo necessário a conversão dos dois pontos de fixação para um centrado com o acessório de suporte do motor. Desta forma, é dada a possibilidade de o grupo poder rodar em torno do eixo criado. Na figura 18 temos a montagem dos grupos compostos por roda, motor e sensor de velocidade no chassis.

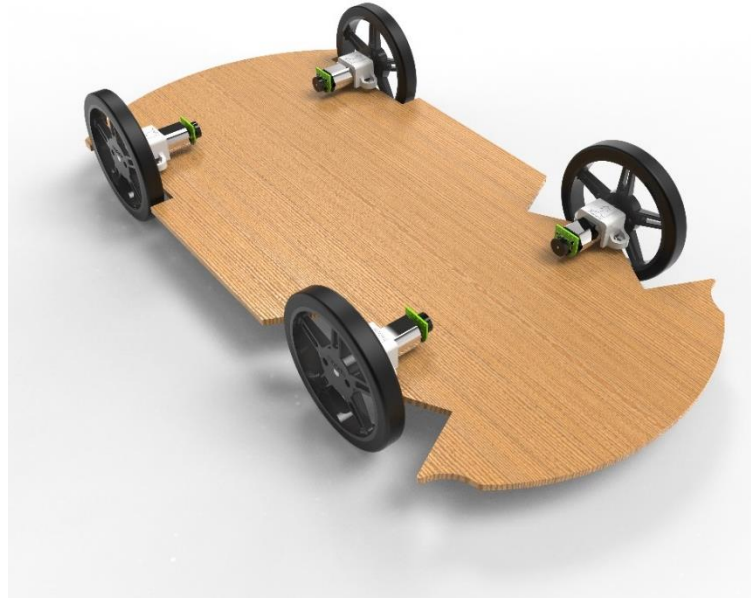


Figura 18 – Montagem dos grupos compostos por roda, motor e sensor de velocidade no chassis

3.1.4 Direção e servo motor

A criação da direção de um veículo de pequena escala exige um sistema que permita um movimento proporcional a um comando enviado por um controlador. Este dispositivo deverá verificar a posição atual e através de um sinal descrever um movimento de acordo com o solicitado.

Foi usado para a construção do sistema de direção um micro servo motor de elevada velocidade ($0.1s/60^\circ$), baixo custo, leve ($9g$) e com a tensão de operação de acordo com o requerido para o protótipo. Uma das principais conclusões que foram feitas a partir de pesquisas realizadas em IRS [39] foi a importância do atuador de direção, que tem um papel fundamental na resposta geral do veículo. Verificou-se que um servo motor lento gera uma limitação no controlo dinâmico do veículo [17]. Com base nestas conclusões, decidiu-se aplicar um servo motor rápido com uma velocidade máxima igual ao modelo aplicado em [17]. Desta forma, não se corre riscos futuros no controlo do protótipo.

O servomotor permite a rotação controlada de um eixo em 180° , em ambos os sentidos. Logo, para a construção da direção, foi necessário converter a rotação do eixo do servomotor com o movimento descrito pelas rodas dianteiras. Este problema foi ultrapassado com o desenvolvimento de um conjunto de ligações metálicas, que permitissem a sincronização destes movimentos, aliado à possibilidade de afinação.

Descrição das peças que compõe a direção construída, representadas na figura 19:

1. Eixo de rotação das ligações metálicas por parafuso com porcas de freio, não apertadas totalmente para permitir movimento;

2. Extensor de afinação do comprimento da direção com porcas de freio, permite o alinhamento das rodas;
3. Eixo de rotação do servomotor;
4. Braço da direção.

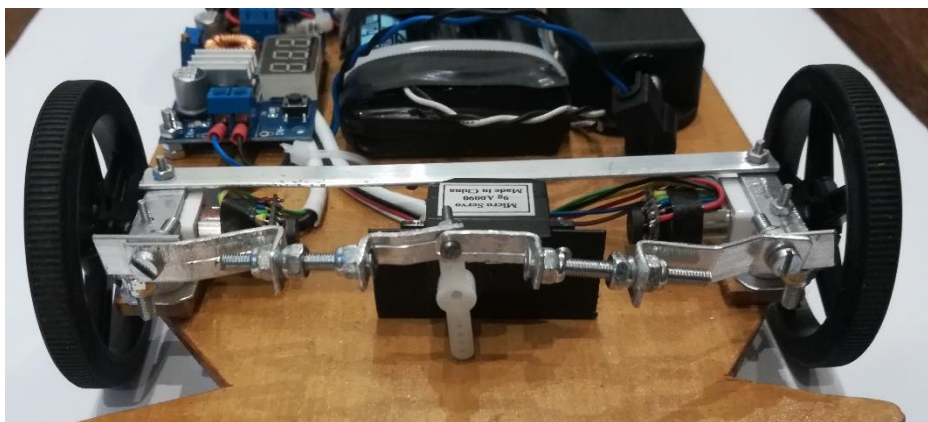


Figura 19 – Sistema de engrenagens que compõem a direção

O servomotor, devido à sua reduzida dimensão, foi elevado por forma a nivelar o sistema de direção e permitir que o componente em plástico conectado ao seu eixo se posicione na posição central 90°, ou seja, direção alinhada com o chassis.

As forças exercidas na direção com o movimento do VPE, permitiam o desenroscar das porcas, por isso houve a necessidade de utilizar porcas de freio para impedir a movimentação dos componentes.

Foi reduzida a força necessária para deslocar a direção, com o prolongamento dos componentes com o número 4.

As engrenagens que compõem a direção foram criadas manualmente, com o recurso a ferramentas de serralharia e posteriormente integradas nas imagens CAD.

O servomotor conforme referido anteriormente, permite uma rotação de 180°, logo para a direção se mover para a esquerda, conforme representado na figura 20, o microcontrolador deverá colocar o servomotor na posição de 0°. A figura 21 representa a direção para a esquerda, em que a ordem deverá ser de 180°.

A posição central é alcançada aos 90°.



Figura 20 – Direção para a esquerda



Figura 21 – Direção para a direita

3.1.5 Controlador de motores e microcontrolador

Um dos objetivos desta investigação é a criação de uma plataforma de testes que permita a aquisição de informação relevante para o teste de algoritmos de sistemas de controlo. Surge assim a necessidade de um sistema de controlo que pudesse ser totalmente incorporado num veículo de pequena escala e que permitisse a realização de testes aos algoritmos desenvolvidos.

Para alcançar este objetivo é necessário a introdução no sistema de uma unidade de processamento dos dados dos vários periféricos e a atuação em função das instruções programadas. Segundo o diagrama da figura 11, é necessário um microcontrolador capaz de gerir todos os componentes, os vários protocolos de comunicação e que seja compatível com um controlador de motores que tenha os requisitos necessários no controlo dos vários motores.

Os quatro motores DC embutidos nas rodas, podem atingir no máximo uma corrente de 1.6A e têm uma tensão de funcionamento de 6 V. O servo motor opera na mesma gama de tensões. Com base nestas características, foi encontrado na *Adafruit* um módulo desenvolvido para *Arduino* que respeita os requisitos.

O módulo selecionado é segundo o fabricante, uma versão melhorada do anterior. A versão mais atual permite o controlo de 1.2A por canal e 3A de pico, graças à alteração do driver de *darlington L293D* para o *mosfet TB6612*. Este módulo tem quedas de tensão mais baixas através do motor, possibilitando às baterias fornecer um binário superior e possui maior proteção devido à instalação de díodos *flyback*.

Uma das grandes vantagens deste controlador é a gestão do PWM que está a cargo do chip do modulo e não às saídas de PWM do *Arduino*. A comunicação entre ambos é através de I2C, facilitando a instalação tendo em conta que este tipo de comunicação só usa dois condutores (SDA e SCL). Na figura 22 mostra o controlador de motores da Adafruit para *Arduino* usado no VPE.

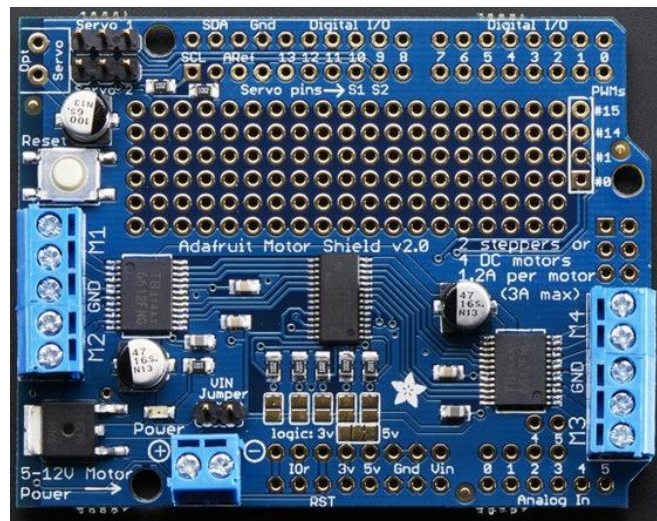


Figura 22 – Controlador de motores Adafruit Motor/Stepper/Servo Shield para *Arduino* Kit - v2.3

Este módulo oferece uma área para prototipagem, que permite a instalação de componentes adicionais. Foi desenvolvido para ser compatível com a plataforma de desenvolvimento *Arduino*. Dos modelos compatíveis foi selecionado o *Arduino Mega*, representado na figura 23, por disponibilizar maior número de sinais digitais e analógicos, maior capacidade de memória (*EEPROM*, *SRAM* e *Flash*) e mais portas de comunicação série. Uma plataforma de

desenvolvimento com características superiores aumenta a flexibilidade e a expansibilidade do projeto no futuro. Caso contrário, por alguma limitação, o projeto poderia ser posto em causa.

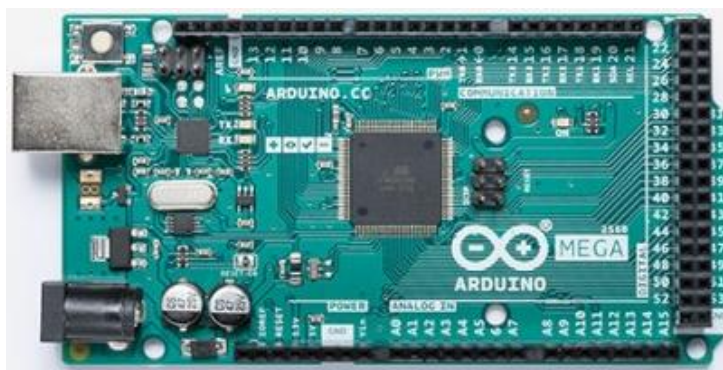


Figura 23 – Kit de desenvolvimento Arduino Mega

A escolha do *Arduino* para além da compatibilidade com o módulo dos motores, possui inúmeras vantagens das quais se destacam: plataforma *open-source*, acesso a uma comunidade de desenvolvimento de hardware e software, fóruns de discussão de problemas, bibliotecas e código desenvolvido.

3.1.6 Aspetos energéticos

Os automóveis elétricos apesar de possuírem enormes vantagens, ainda carecem de três limitações: a autonomia, o tempo de carga e o custo elevado [8]. Estes representam os maiores desafios dos veículos elétricos e estão todos relacionados com as baterias. É fundamental criar um modelo adequado do veículo, por forma a estimar a energia consumida face aos requisitos propostos na sua construção [8]. A construção do modelo obriga a que cada componente seja corretamente dimensionado, podendo-se estimar com segurança a capacidade da bateria e suas características, tornando o projeto viável em termos energéticos.

Nos veículos de grande escala existem muitas arquiteturas e modelos de gestão energética, os totalmente elétricos, híbridos e conforme descrito em [48].

O sistema de alimentação do modelo de pequena escala a desenvolver é composto por dois elementos: uma bateria e um regulador de tensão. Este último permitirá alimentar todos os componentes com a mesma tensão de funcionamento. A tensão de 5VDC foi a selecionada por se encontrar dentro da gama de tensão de funcionamento de todos os componentes envolvidos no sistema.

A bateria usada é composta por 3 células de íões de lítio com cerca de 18mm de diâmetro, 65mm de comprimento e cerca de 2600mAh de capacidade nominal. Este tipo de células, de acordo com o *datasheet*, possui uma tensão máxima de carregamento de 4.2V e tensão mínima de descarga permitida de 3V. Cada bateria conta com proteções contra sobrecarga e sobre descarga. Tendo em conta que são 3 baterias em série, o conjunto terá uma gama de tensão permitida de 9V a 12.6V. Por forma a controlar a carga do veículo, o regulador de tensão escolhido possui um voltímetro, que permite em tempo real medir a tensão de entrada, que corresponde à tensão das baterias, possibilitando a gestão do tempo de funcionamento do veículo entre carregamentos, como descrito na figura 24.

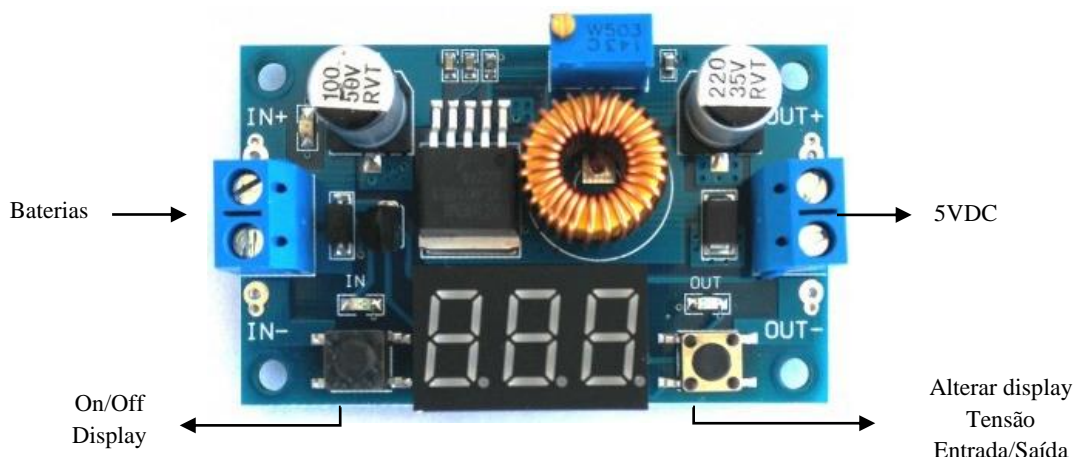


Figura 24 – Regulador de tensão com voltímetro de medição à entrada e à saída

Por forma a determinar a autonomia do veículo, foi medido o consumo de todos os componentes em três tipos de teste, conforme demonstrado na tabela 5:

Tabela 5 – Testes para medição da autonomia do VPE

Tipo de Teste	PWM aplicado aos motores	Consumo (mA)	Capacidade	Autonomia (minutos)
Parado	0	105	0.04C	≈ 1485
Circunferência	60% (2.7V)	515	0.2C	≈ 303
Linha reta	80% (3.7V)	720	0.28C	≈ 217

Com base nos dados da tabela anterior, mesmo no teste em que os motores consumiram mais energia, a autonomia é superior a três horas de funcionamento. Os testes efetuados servem apenas para dar uma estimativa da autonomia do protótipo em condições ideais de velocidade e comportamento.

Os testes de medição de consumo foram realizados com o auxílio de um amperímetro conectado à saída da bateria.

3.1.7 Modelação 3D e construção final

Nesta fase da dissertação com todos os componentes selecionados e adquiridos, procede-se à modelação final em 3D e consequentemente à montagem física do protótipo.

A modelação 3D deste veículo beneficiou a construção final em diversos aspetos:

- Estudo da melhor disposição dos componentes;
- Previsão da aparência final do veículo, visto os componentes estarem à escala e com cores aproximadas;
- Poupança de tempo, permitindo ajustes sem a necessidade de recomeçar um novo modelo;
- Economia, visto não haver desperdício em experiências na concretização do protótipo;
- Rapidez no planeamento da construção do veículo.

A maior parte dos fabricantes dos componentes selecionados disponibilizaram os ficheiros nos formatos 3D, tornando a criação do CAD mais fácil e rápida. Após a obtenção do modelo 3D, foram processadas várias vistas através de um software de renderização, permitindo a criação de imagens mais realistas. Foram processados vários elementos tais como: Iluminação, textura e cor nos diversos componentes com a finalidade de melhorar a apresentação do modelo, como pode ser observado na figura 25 e 26.

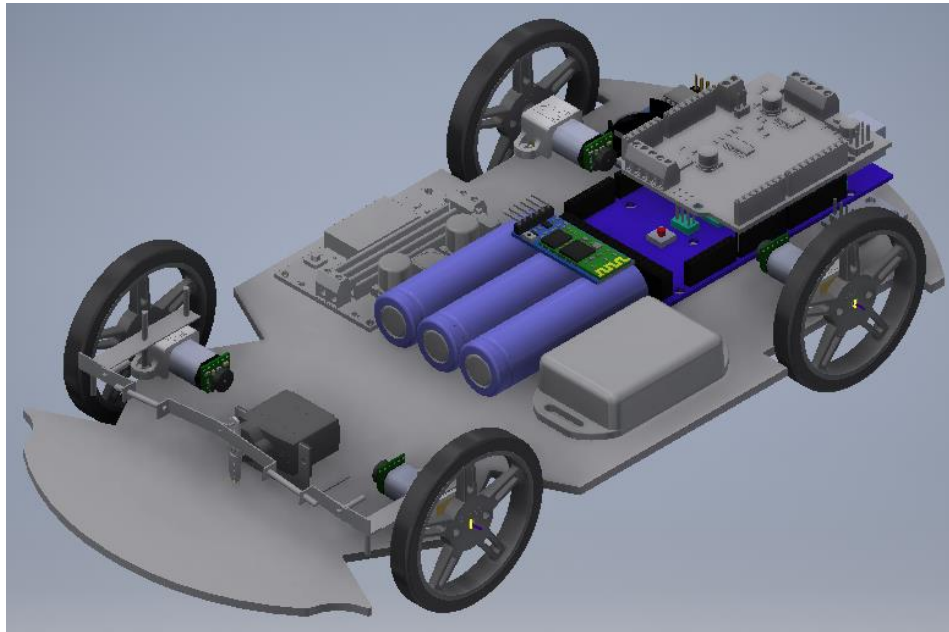


Figura 25 – Modelo 3D do VPE

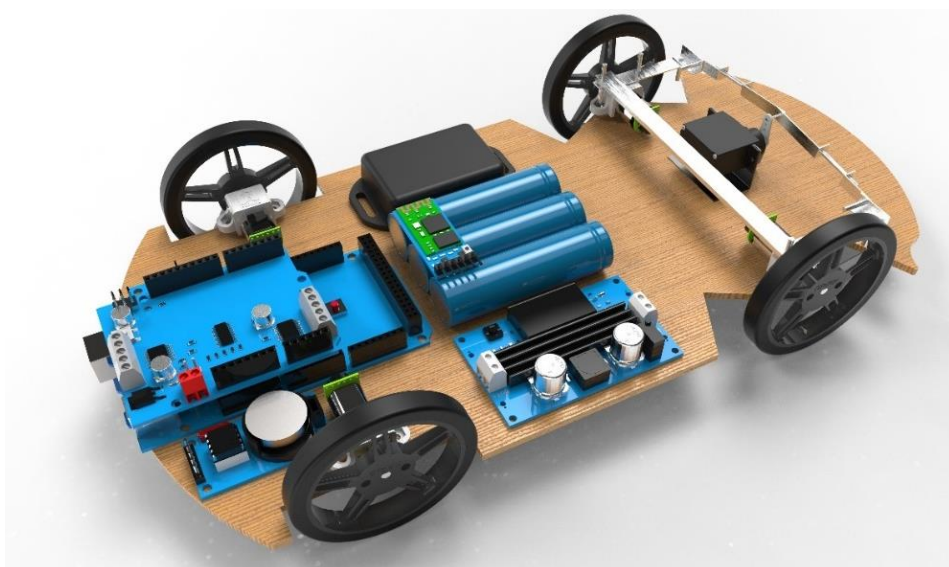


Figura 26 – Renderização do modelo 3D do VPE

Para além das vantagens referidas anteriormente, o desenho em 3D através de um software CAD possibilita a criação de vários componentes numa impressora 3D, como por exemplo: chassis, suportes do motor, engrenagens da direção, suporte do servomotor, tendo a vantagem de serem mais leves e permitirem a criação de um VPE idêntico ao modelo atual. Esta mais valia com base

nos testes a serem realizados no futuro, permite uma melhoria contínua nas peças envolvidas do veículo.

Na figura 27 é apresentada uma imagem real do veículo de pequena escala, numa perspetiva idêntica às imagens do modelo 3D anteriores, para melhor compreensão dos desenvolvimentos.

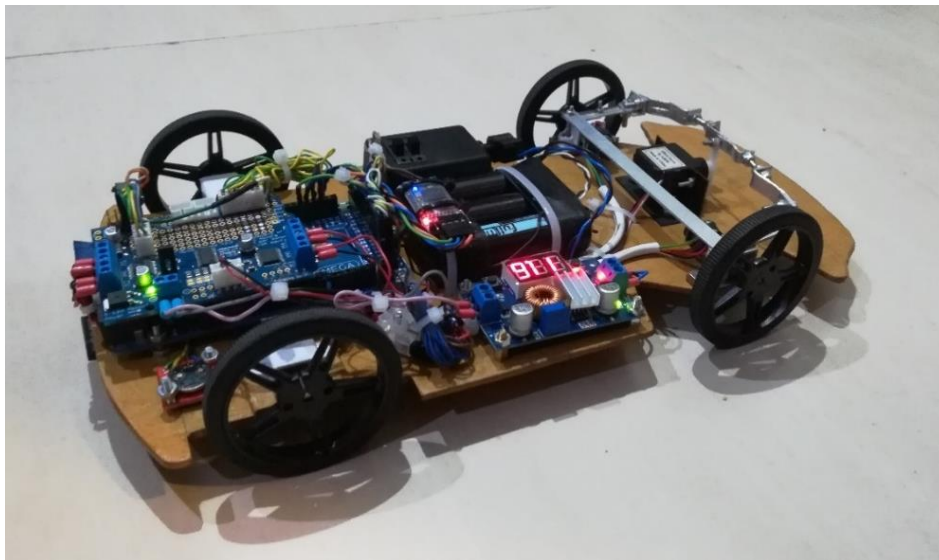


Figura 27 – Veículo real de pequena escala

Mais perspetivas dos modelos 3D encontram-se em anexo.

3.1.8 Arquitetura de controlo

A criação de uma arquitetura de controlo de um veículo em pequena escala, com a função de simular comportamentos de um automóvel real, obriga ao levantamento das variáveis de entrada e de saída do sistema. Um condutor num veículo real, de uma forma simplificada, fornece ao sistema três variáveis, direção, aceleração e travagem. O modelo a criar contempla conforme descrito anteriormente quatro motores elétricos embutidos em cada roda, regidos por um controlador que transmite aos motores a tensão em função do PWM recebido. O aumento do PWM em relação ao valor anterior produz aceleração. O inverso produz desaceleração, que na prática se traduz em travagem.

O microcontrolador através de uma ordem em graus, envia ao servomotor um valor de PWM para posicionar a direção com a inclinação das rodas desejada.

Estas ordens são enviadas ao veículo através de Bluetooth, conforme figura 11. Foi escolhido este sistema por permitir a comunicação com dispositivos portáteis bastante comuns nos dias de hoje, como é o caso do PC, smartphone, tablet entre outros. Abrindo um simples terminal de comunicação série, é possível enviar valores de potência e direção e receber dados, tais como: velocidades angulares e velocidade longitudinais em cada roda. A frequência de receção dos dados pode ser configurada por software.

Através dos dados anteriores, é possível aplicar algoritmos de controle, que vão melhorar a manobrabilidade e comportamento do veículo (2.4).

Em termos de protocolos de comunicação, o microcontrolador comunica com o controlador de motores, acelerómetro e RTC (*Real Time Clock*) através de um barramento serie I2C [49], que é composto por duas linhas: uma de dados e outra de relógio, ambas bidirecionais e com resistência de *pullup*, na tensão de 5VDC. Os periféricos são acedidos através de um endereço, permitindo ao microcontrolador comunicar com eles no mesmo barramento.

Tendo em conta que um dos objetivos deste projeto é a recolha de dados do comportamento do veículo, foi adicionado um cartão de memória para armazenamento da informação resultante dos testes, num formato *comma-separated values* e nome do ficheiro em formato de data. O leitor de cartões comunica com o microcontrolador através do barramento SPI (*Serial Peripheral Interface*) [49]. A rotina responsável pela criação dos ficheiros e escrita dos dados permite configuração na frequência de escrita, com o objetivo de aumentar o detalhe do registo da informação e, se for caso disso, não retirar performance à unidade de processamento.

A plataforma foi dotada de dois interruptores que permitem ativar duas entradas digitais no microcontrolador, permitindo a ativação de quatro funcionalidades ou algoritmos implementados. Desta forma é possível, mudar a configuração do veículo sem recorrer à programação, realização de testes diferentes em ambientes semelhantes, rapidez no apuramento de conclusões, ativação ou inativação de alguma funcionalidade, tornando assim a plataforma mais versátil.

3.1.9 Implementação de Código para controlo do veículo

Surge a necessidade de criação de um *software* que interligue todos os componentes, de forma a criar uma plataforma de testes flexível e robusta o suficiente para a aquisição de dados. O ambiente de desenvolvimento usado foi o *Arduino Software IDE*, por ser totalmente compatível com a placa usada, estar disponível para a maior parte dos sistemas operativos e ser *open-source*. Os programas escritos neste software são guardados com a extensão “.ino”. O editor possui recursos tais como: recortar/colar, pesquisa/substituir texto, realce de sintaxe e indexação automática. Possui uma área de mensagens que serve para a exibição de erros e outras informações nas operações de guardar, exportar ou compilar o código. O *Arduino IDE* contém um programa que permite converter o código desenvolvido numa codificação hexadecimal que é carregado através de um *Firmware* designado por *Bootloader*, incluído na placa. As placas dotadas do *chip FTDI FT232* permitem a programação por *USB* a partir do *PC*.

A linguagem usada é C e o código apenas requer duas funções:

- *Setup()*: esta função é chamada apenas uma vez durante a inicialização do sistema e é usada por exemplo: para iniciar variáveis, configuração dos modos dos sinais de entrada e saída e outras bibliotecas necessárias ao programa;
- *Loop()*: esta função é executada repetidamente durante o programa e inicia-se após a anterior estar finalizada. É responsável pelo controlo da placa até o sistema desligar ou reiniciar.

Um dos pontos fortes deste *software* é a existência de bibliotecas que permitem simplificar o desenvolvimento do código, disponibilizando funções para a manipulação de *hardware*, dados, entre outros.

O *software* desenvolvido para o veículo tem por base seis grupos principais com as seguintes funções:

1. Início: inclusão de bibliotecas, configuração dos sinais de entrada, saída, relação da caixa do motor, diâmetro da roda, tempo de repetição das funções principais e inicialização de variáveis;
2. Setup() que tem a função da iniciação das seguintes funções:
 - Comunicação *Bluetooth*;
 - Leitura das rotações dos motores;
 - Temporização das leituras das principais funções;
 - Configuração dos motores;
3. Entrada de dados: responsável pela aquisição e conversão dos dados do condutor (direção, aceleração e desaceleração);
4. Controlo dos motores das rodas e direção;
5. Comunicação *Bluetooth*: envio dos dados recolhidos dos sensores e dados de entrada;
6. Armazenamento dados: Criação de ficheiros e escrita de dados.

As funções a seguir ao ponto dois, estão incluídas da função loop().

O fluxo do programa não é linear, ou seja, a execução de uma função não pode depender da execução da anterior, logo foi criada uma estrutura de repetição das funções individualmente, tendo em conta um período pré-definido. A ordem da execução das funções é efetuada de acordo com o tempo configurado inicialmente. Desta forma é possível aumentar ou reduzir a frequência de amostragem, como representado na figura 28.

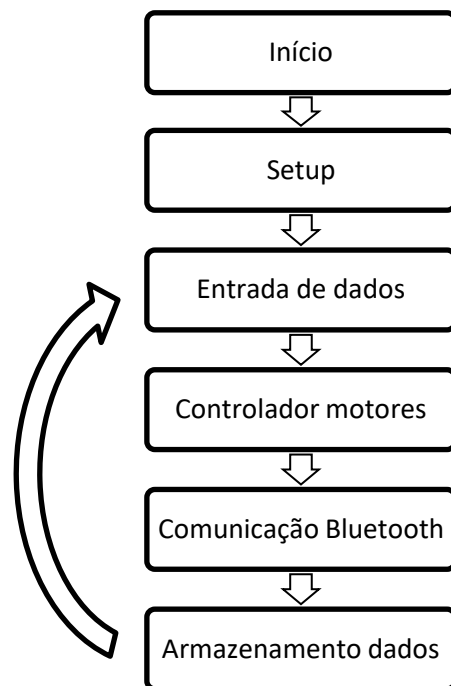


Figura 28 – Diagrama de fluxo de funções

Exemplos da utilidade no aumento ou diminuição da frequência de processamento:

- Aumento da frequência na aquisição de dados para a deteção de uma anomalia no comportamento do veículo;
- Aumento da velocidade de processamento no controlo da velocidade das rodas;

- Diminuição das amostras armazenadas no cartão de memória, para aumento da performance do microcontrolador;
- Aumento na aquisição de dados do condutor.

Esta estrutura de código foi possível com recurso à biblioteca “*Timer*”, disponibilizada pelo *Arduino*.

3.2 *Parametrização para adequação à escala*

O conceito de similaridade é um dos mais importantes aspetos na análise dimensional. Se dois sistemas podem ser definidos com as mesmas variáveis e operam nas mesmas condições, então podem ser considerados similares [14].

Um protótipo, para ser semelhante a um veículo à escala, implica não só a escala de geometria mas também assegurar que o modelo à escala opera nas mesmas condições que o modelo real. Existem três fatores de escala a considerar: geometria (dimensões), dinâmica (forças) e cinética (velocidade) [14].

De acordo com o método descrito em 2.7, os parâmetros obtidos para a determinação de semelhança dinâmica são:

$$\Pi_1 = \frac{a}{L}, \quad \Pi_2 = \frac{b}{L}, \quad \Pi_3 = \frac{C_{af}L}{MV_x^2}, \quad \Pi_4 = \frac{C_{at}L}{MV_x^2}, \quad \Pi_5 = \frac{J_z}{ML^2} \quad (3.4)$$

O processo de construção de um veículo em pequena escala é difícil, uma vez que todos os parâmetros Π podem corresponder na totalidade com o veículo real. Contudo, é possível obter a semelhança, ainda que aproximada seguindo um procedimento descrito em [17]:

1. Construir um veículo a uma determinada escala;
2. Escolher uma velocidade de operação do veículo real para a correspondência;
3. Adicionar massa ao veículo, mantendo a correspondência dimensional entre os parâmetros Π_1 e Π_2 ;
4. Medir o momento de inércia do veículo J_z . Se o momento de inércia for muito pequeno, adicionar massa de forma simétrica à volta do centro de massa até atingir o valor desejado de J_z ;
5. Determinar o coeficiente de rigidez lateral dos pneus à escala;
6. Determinar a velocidade de operação do veículo à escala de forma a igualar os parâmetros relacionados;
7. Assegurar que a essa velocidade os restantes parâmetros Π estão correspondentes. Se não, selecionar pneus diferentes à escala reduzida ou adicionar massa ao veículo e repetir os passos anteriores.

O primeiro ponto do procedimento anterior foi concluído através da criação da réplica a partir do modelo à escala 1/14, segundo os parâmetros geométricos medidos, conforme descrito na tabela 1.

A escolha do conjunto motor, engrenagem e roda, definiu a velocidade de operação, respondendo ao segundo ponto do procedimento.

Os restantes pontos não puderam ser determinados, uma vez que o protótipo estava em fase de desenvolvimento. Assim que o protótipo foi concluído, procedeu-se à obtenção dos parâmetros II, com vista à semelhança dinâmica do veículo.

3.2.1 Localização do centro de gravidade

A localização do centro de gravidade pode ser medida através de dois métodos: o primeiro envolve a colocação do protótipo equilibrado numa barra com uma aresta fina na zona entre eixos e entre rodas. O segundo método consiste na pesagem através de duas balanças, uma nas rodas frontais e a outra as rodas traseiras, conforme descrito em [35].

Foi usado inicialmente o método do equilíbrio numa barra, conforme figuras 29 e 30.

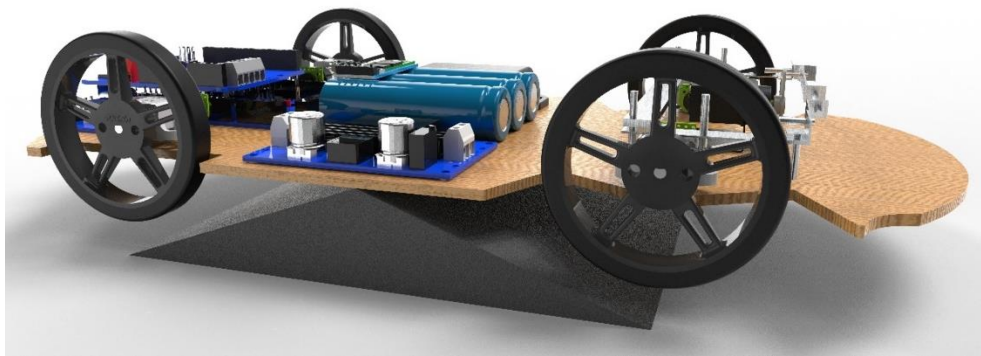


Figura 29 – Posicionamento do VPE em equilíbrio sobre uma aresta fina entre eixos

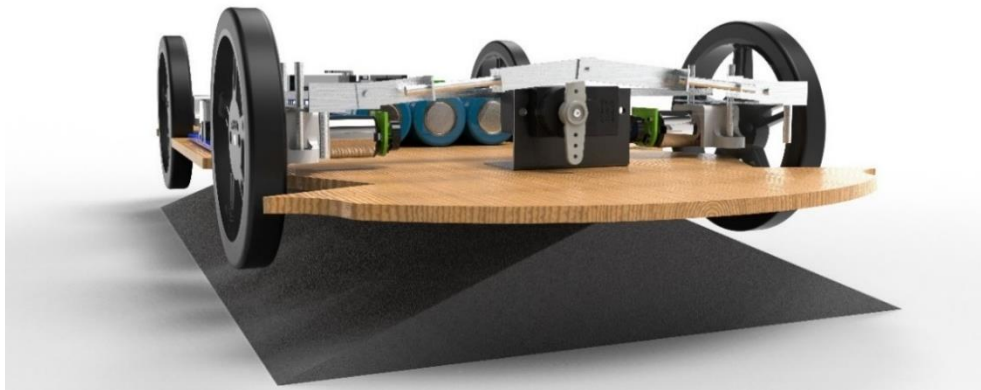


Figura 30 – Posicionamento do VPE em equilíbrio sobre uma aresta fina entre rodas

Colocado o veículo em equilíbrio com a barra posicionada entre os dois eixos conforme figura 29, foi medida a distância entre o eixo das rodas frontais e a linha coincidente com a barra. A mesma medição é feita para o eixo traseiro. Desta forma é obtida a distância do eixo frontal ao centro de massa (a) e a distância do eixo traseiro ao centro de massa (b).

A medição da distância das rodas ao centro de massa é através da colocação do veículo em equilíbrio com a barra posicionada entre rodas, conforme figura 30.

O centro de massa é obtido através da interceção das duas linhas. São apresentados de seguida os resultados das medições dos testes para o método das barras.

L: 0.140m (Distância entre rodas)

W: 0.175m (Distância entre eixos)

a: 0.095m (Distância do centro de massa do veículo ao eixo da frente)

b: 0.080m (Distância do centro de massa do veículo ao eixo de trás)

Na figura 31 é identificado o local do centro de gravidade, através dos valores obtidos pelo método da barra.

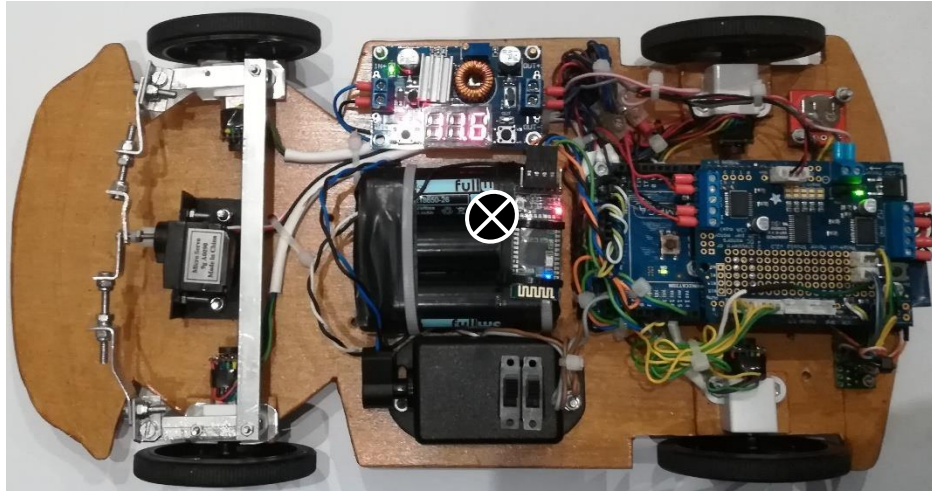


Figura 31 – Localização real do centro de gravidade no VPE

Os resultados obtidos permitem o cálculo dos dois primeiros parâmetros Π , referidos em 2.7.2.

$$\Pi_1 = \frac{a}{L} = \frac{95}{175} = 0.54 \quad (3.5)$$

$$\Pi_2 = \frac{b}{L} = \frac{80}{175} = 0.46 \quad (3.6)$$

O segundo método foi efetuado colocando o VPE no centro de duas balanças idênticas em ambos os eixos como descrito na figura 32.

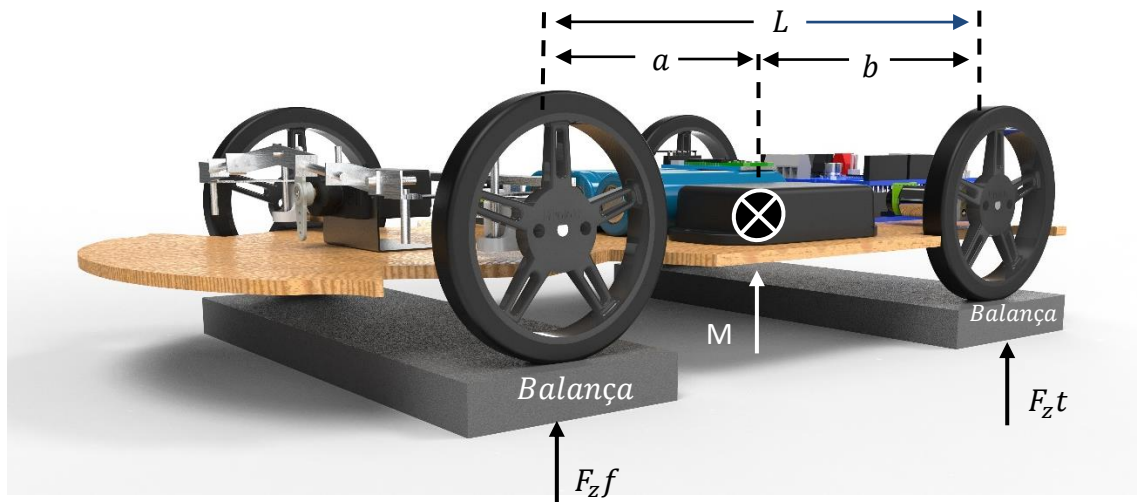


Figura 32 – Disposição das forças no VPE, para o cálculo do centro de gravidade

As distâncias a e b, são calculadas através das seguintes equações [35]:

$$F_{zf} = \frac{M \cdot a}{L} \quad (3.7) \quad \text{logo,} \quad a = \frac{F_{zf} \cdot L}{M} = 0.080m$$

$$F_{zt} = \frac{M \cdot b}{L} \quad (3.8) \quad \text{logo,} \quad b = \frac{F_{zt} \cdot L}{M} = 0.095m$$

F_{zf} : 0.268 Kgf (Força exercida pelo eixo frontal)

F_{zt} : 0.318 Kgf (Força exercida pelo eixo traseiro)

M : 0.586 Kg (Massa total do veículo)

Com base nos resultados dos dois métodos, pode-se concluir que o centro de massa está ligeiramente mais perto do eixo traseiro. Facto muito comum em veículos telecomandados, devido à colocação das baterias mais perto da traseira, sendo este o componente mais pesado.

No caso dos veículos reais de combustão, o mesmo não se verifica, visto os componentes mais pesados, motor e transmissão, encontrarem-se normalmente na zona frontal [35]. Para criarmos uma semelhança entre os dois modelos, é necessário a alteração do centro de massa do VPE, existindo para isso, dois métodos: o primeiro é a adição de peso na frente do veículo por forma a compensar o peso exercido pela bateria e o segundo é o deslocamento de componentes para o eixo frontal.

Um dos problemas do primeiro método é a alteração do peso que altera outros Π do grupo, podendo inviabilizar a semelhança com o veículo a testar. Por este motivo o segundo método deverá ser a escolha preferencial. Durante a construção do protótipo este fator foi tomado em conta, por isso a bateria sendo o componente mais pesado foi colocado na zona central, deixando espaço à volta disponível para a sua movimentação, por forma a permitir a alteração do centro de gravidade.

3.2.2 Cálculo do momento de inércia

A medição do momento de inércia de um veículo exige um método mais elaborado do que a medição do centro de massa. Este parâmetro é necessário para o cálculo do Π_5 .

$$\Pi_5 = \frac{J_z}{ML^2} \quad (3.9)$$

Existem vários métodos para o cálculo do momento de inércia em torno do eixo z, descritos em [14], mas o método escolhido foi a divisão do VPE em dois blocos, correspondentes à bateria e ao resto do veículo, e efetuada uma aproximação em termos de forma e distribuição de peso [35].

Para cada bloco, considera-se que o momento de inercia é:

$$J = \frac{1}{12}M(\text{Comprimento}^2 + \text{Largura}^2) \quad (3.10)$$

O cálculo do MI total em torno do eixo z é:

$$J_{Total} = J_{Car} + M_{Car}d_{Car}^2 + J_{Battery} + M_{Battery}d_{Battery}^2 \quad (3.11)$$

J_{Car} : MI do bloco correspondente ao VPE sem a bateria (0.0038Kgm²)

M_{car} : massa do VPE sem a bateria (454gr)

d_{car} : distância entre o CG e o cento do veículo (10mm)

$J_{battery}$: MI da bateria (0.000079kgm²)

$M_{battery}$: massa da bateria (132gr)

d_{bat} : distância entre o CG e o centro da bateria (14.5mm)

Através das duas equações anteriores o momento de inércia total, que corresponde ao MI do veículo segundo o eixo ZZ, é de:

$$J_z = 0.00395 \text{ kg.m}^2 \quad \text{Logo, } \Pi_5 = 0.22$$

Com base em [35], o valor de Π_5 obtido é muito semelhante aos veículos de grande escala, como por exemplo o *Ford Escort* de 1989 ($\Pi_5 = 0.219$), que em termos de formato e dimensão se assemelha ao *Renault Megane* de 1999, que serviu de base para a construção do VPE.

No caso do momento de inércia dos veículos a assemelhar serem mais altos, deve-se elevar o MI, colocando pesos nas extremidades do VPE, por forma a não alterar o centro de gravidade calculado anteriormente. Como representado na figura 33, inicialmente deve-se procurar nas extremidades do chassis o melhor local para a colocação dos pesos: se as distâncias de ambas as zonas forem iguais ao CG, os pesos a adicionar devem ser iguais, caso as distâncias sejam diferentes, deve-se respeitar a seguinte equação:

$$M_1 d_1 = M_2 d_2 \quad (3.12)$$

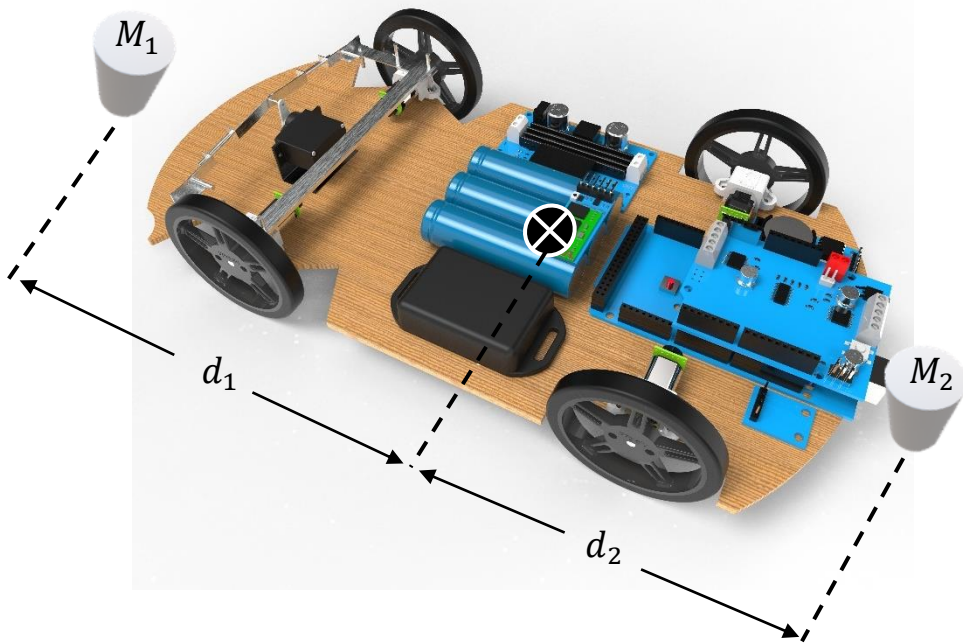


Figura 33 – Disposição das massas pelo VPE para o cálculo do MI

Um dos principais problemas na colocação dos pesos será encontrar os pesos com as características ideais para cumprir com o objetivo proposto. Uma das soluções será uma barra cilíndrica maciça e achar a sua relação entre a distância e o peso total. Com base nessa relação, será possível cortar cilindros com o peso e dimensões desejados.

Neste caso o MI para os cilindros a colocar será:

$$J_z = \frac{1}{2}Mr^2 \quad (3.13)$$

Logo, adicionando dois pesos nas extremidades, o MI será o seguinte:

$$J_{\text{modificado}} = J_{\text{não-modificado}} + \frac{1}{2}M_1r_1^2 + M_1d_1^2 + \frac{1}{2}M_2r_2^2 + M_2d_2^2 \quad (3.14)$$

Como o objetivo será assemelhar o Π_5 :

$$\Pi_5 = \frac{J_{\text{modificado}}}{(M + M_1 + M_2)L^2} \quad (3.15)$$

Com base nas duas equações anteriores é possível aumentar o MI adicionando pesos nas extremidades do VPE sem alterar o CG, por forma a equiparar-se com veículos de grande escala.

3.2.3 Análise dos parâmetros Π

Por forma a enquadrar os resultados obtidos num cenário próximo da realidade, foram comparados os valores obtidos anteriormente do VPE, conforme representado na tabela 6, com os de vários veículos de grande escala descritos em [35].

Tabela 6 – Comparativo dos parâmetros Π de veículos reais com o VPE com base em [35]

	<i>Ford Escort</i>	<i>Honda Civic</i>	<i>VW Jetta</i>	<i>Jeep Wrangler</i>	<i>VPE</i>
Π_1	0.38	0.38	0.36	0.46	0.54
Π_2	0.62	0.62	0.64	0.54	0.46
Π_5	0.22	0.22	0.27	0.23	0.22

Analisando a tabela, pode-se concluir através dos parâmetros Π_1 e Π_2 que o CG do VPE está mais próximo do eixo traseiro do que os restantes veículos. Conforme referido anteriormente, isto deve-se ao peso exercido pelo motor dos veículos de combustão, que coloca o CG mais próximo do eixo frontal. A semelhança do VPE pode ser ajustada a qualquer tipo de veículo, seguindo o procedimento referido no ponto 3.2.

O parâmetro Π_5 , responsável pelo momento de inércia do VPE está muito semelhante com dois primeiros veículos, que sendo dos mais baixo, aumenta a facilidade de rotação em torno do eixo z, ou seja, capotamento. Dos veículos expostos anteriormente, o que apresenta maior dificuldade em capotar é o VW Jetta. Seguindo o procedimento descrito em 3.2.2, é possível aumentar o MI do VPE, por forma a assemelhar a qualquer veículo.

Finalmente, por forma a garantir a semelhança dinâmica de todos os parâmetros Π , é necessário a determinação dos parâmetros em falta, Π_3 e Π_4 , que representam o coeficiente de rigidez dos pneus. Estes parâmetros têm grande influência no comportamento dos automóveis, visto definirem a capacidade de deslizamento do pneu. De acordo com o modelo do Pneu de *dugoff*, conforme descrito no ponto 2.3, foi definida uma constante que descreve a relação entre a força da direção do pneu e o ângulo do mesmo. Os parâmetros Π_3 e Π_4 dependem das constantes de rigidez do pneu no eixo frontal e no eixo traseiro, respetivamente.

Por forma a determinar os dois parâmetros em falta, é necessário obter por parte do fabricante informação sobre o coeficiente de rigidez dos pneus [14]. Infelizmente, esta informação não está disponível para os pneus escolhidos. Segundo [35], é possível calcular o coeficiente de rigidez do pneu através de um sistema criado para esse efeito. Este sistema é composto pelos seguintes componentes: tapete rolante, braço móvel, eixo vertical, codificador ótico e um conjunto de pesos, como mostra a figura 34.

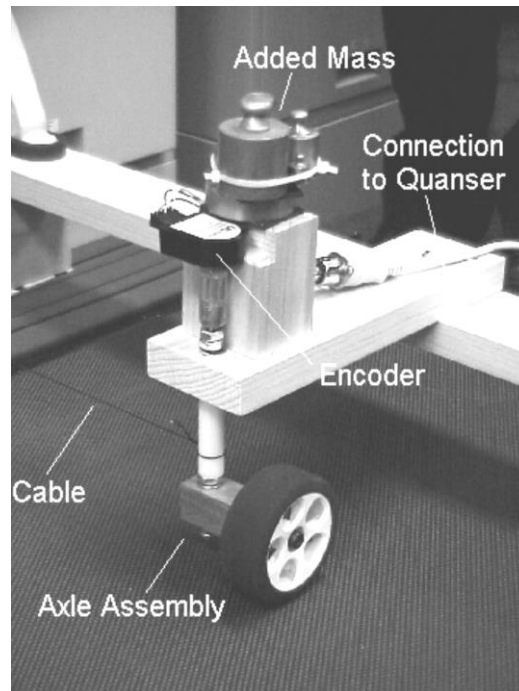


Figura 34 – Sistema de medição do coeficiente de rigidez do pneu [36]

Tendo em conta que a rigidez das curvas é a relação entre a força de direção e o ângulo de deslizamento, o sistema apenas terá de determinar estes dois valores.

O funcionamento do equipamento consiste em forçar o braço móvel composto pelo eixo vertical e pela roda a permanecer paralelo com a direção do movimento do tapete, provocando um ângulo de viragem à roda, sendo este o ângulo de deslizamento do pneu. Este valor é medido através do codificador ótico. O segundo valor é a força de direção, que será equivalente ao conjunto de pesos aplicados. Para aumentar a precisão do teste, o rolamento da roda e o conjunto de pesos deverão ser semelhantes ao existente no VPE. Outro fator para aumentar a precisão será o número de contagens por rotação do sensor ótico. Quanto maior for a precisão do sensor, maior será a precisão do ângulo medido.

Por fim, para garantir que o coeficiente de deslizamento é semelhante a um veículo real, deve-se seleccionar vários tipos de pneus e realizar testes até encontrar um semelhante.

Devido à complexidade na montagem deste sistema e por não ser o foco deste trabalho, o cálculo dos parâmetros Π_3 e Π_4 não foram determinados.

A semelhança dinâmica entre o VPE e um veículo real só pode ser garantida se todos os parâmetros Π forem obtidos e ajustados.

3.2.4 Ensaios durante a construção do veículo

Foi criado um conjunto de testes, por forma a averiguar o comportamento do veículo construído. Estes testes vão demonstrar a funcionalidade de cada componente, revelar se os objetivos propostos foram alcançados, se a montagem foi bem executada, se a arquitetura desenvolvida tem falhas e dar a conhecer possíveis melhorias.

Durante a construção do VPE, os componentes foram testados em termos de funcionamento, reduzindo o número de problemas possíveis nos testes finais. De seguida são descritos alguns testes criados para os vários componentes durante a montagem:

- Com o auxílio de uma fonte de bancada, foi aplicada tensão aos polos dos vários motores, medido a corrente consumida e verificado o seu funcionamento conforme dados do fornecedor;
- Foi aplicada tensão de operação das baterias, ajustada a tensão de saída do conversor DC-DC para 5VDC e medida a tensão regulada;
- Criação de uma rotina no *Arduino* por forma a testar todos os motores envolvidos, através do controlador selecionado;
- Verificação do número de contagens do sensor de velocidade incluído na roda. A contagem de impulsos foi efetuada através da rotação da roda em 360° e de uma rotina desenvolvida para o microcontrolador. O sistema deverá estar a funcionar corretamente quando o valor devolvido pelo software for igual ao anunciado pelo fabricante do sensor;
- Teste das comunicações Bluetooth em ambos os sentidos, ou seja, envio de um comando do PC para o VPE e este responder com sucesso;
- Por fim, foi criado um programa para controlo de todos os componentes do veículo, por forma a assegurar o seu bom funcionamento e testar se as ligações elétricas estavam bem efetuadas.

Com os passos anteriores bem-sucedidos, garante-se que todos os componentes estão em funcionamento, diminuindo o risco de problemas nos testes de comportamento do veículo.

3.3 Enquadramento do VPE no modelo teórico

Na tese de dissertação “Segurança automóvel: Sistemas de apoio à condução”[43], foi elaborado um modelo matemático que permite simular em Matlab/simulink, o comportamento teórico de um veículo em pequena escala com quatro rodas controladas por quatro motores elétricos independentes.

Sendo esta tese a continuação da tese referida anteriormente, surge a obrigatoriedade de simular o VPE desenvolvido no modelo teórico, com vista à comparação e discussão de resultados. Para se proceder à correta parametrização do modelo teórico do veículo e do motor elétrico, foi necessário a recolha das variáveis e parâmetros que descrevem o VPE. Na tabela 7 são apresentados os valores de todos os parâmetros, que foram calculados durante a concretização do veículo elétrico em pequena escala e os restantes obtidos com o auxílio da tese anterior. A nomenclatura de todos os parâmetros pode ser encontrada na tabela 1.

Tabela 7 – Parâmetros do veículo utilizados para a simulação teórica

Parâmetro	Valor do parâmetro	Unidade
a	0.095	m
b	0.080	m
W	0.140	m
L	0.175	m
r	0.030	m
M	0.586	Kg
J_z	0.00395	Kg.m ²
J_w	25×10^{-6}	Kg.m ²
A_f	0	m ²
C_d	0	Adimensional

Os parâmetros a, b, W, L, r e M dizem respeito às dimensões, dados físicos e cálculo do CG do VPE, obtidos durante o desenvolvimento do VPE. O momento de inércia foi calculado no ponto 3.2.2. O valor usado para o momento de inércia da roda foi o mesmo da tese anterior, partindo do princípio que as rodas de ambas as teses são semelhantes. O coeficiente aerodinâmico e a área frontal, foram considerados ambos zero, tendo em conta a simplicidade física do veículo.

Os parâmetros da tabela 8 dizem respeito ao motor elétrico. O cálculo e a obtenção dos vários valores estão descritos em 3.1.3.

Tabela 8 – Parâmetros do motor elétrico utilizados para a simulação teórica

Parâmetro	Valor do parâmetro	Unidade
R_a	6	Ω
R_a	6	Ω
L_a	3.02×10^{-3}	H
J_m	0.62×10^{-6}	Kg.m ²
D_m	1.34×10^{-6}	N.m/(rad/s)
K_m	27.2×10^{-3}	N.m/A
K_g	1.18×10^{-3}	V/(rad/s)
$V_{a_{max}}$	6	V
P_{max}	1.5	W
N	29.86	Adimensional

4. Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes práticos do VPE e teóricos através do modelo criado na tese anterior [43], por forma a investigar o comportamento da plataforma desenvolvida e atestar o funcionamento de todos os componentes em conjunto. Por forma a garantir a máxima fiabilidade dos testes, foi escolhido um espaço fechado, livre de intempéries, de grandes dimensões, com um piso livre de impurezas, sem irregularidades e nivelado. Para a execução dos testes o piso é um fator de elevada importância, visto se tratar de um veículo com rodas de pequenas dimensões, em que o mínimo de irregularidades altera facilmente o seu comportamento.

Na tabela 9 apresenta-se o significado das legendas e unidades de grandeza utilizadas nos gráficos seguintes, para melhor compreensão.

Tabela 9 – Significado dos símbolos apresentados neste capítulo

Símbolo	Grandeza física	Unidade
R_{xr}	Número de rotações por minuto das rodas de referência	RPM
V_{xr}	Velocidade média longitudinal de referência	km/h
A_{xr}	Aceleração média longitudinal de referência	m/s ²
V_x	Velocidade média longitudinal de referência	km/h
V_y	Velocidade média lateral de referência	km/h
R_{xdd}	Número de rotações por minuto roda direita dianteira	RPM
R_{xed}	Número de rotações por minuto roda esquerda dianteira	RPM
R_{xdt}	Número de rotações por minuto roda direita traseira	RPM
R_{xee}	Número de rotações por minuto roda esquerda traseira	RPM
R_{x4r}	Número de rotações por minuto das quatro rodas	RPM
V_{xdd}	Velocidade longitudinal roda direita dianteira	km/h
V_{xed}	Velocidade longitudinal roda esquerda dianteira	km/h
V_{xdt}	Velocidade longitudinal roda direita traseira	km/h
V_{xee}	Velocidade longitudinal roda esquerda traseira	km/h
V_{x4r}	Velocidade longitudinal das quatro rodas	km/h
A_{xdd}	Aceleração longitudinal roda direita dianteira	m/s ²
A_{xed}	Aceleração longitudinal roda esquerda dianteira	m/s ²
A_{xdt}	Aceleração longitudinal roda direita traseira	m/s ²

A_{xee}	Aceleração longitudinal roda esquerda traseira	m/s ²
A_{x4r}	Aceleração longitudinal das quatro rodas	m/s ²
θ	Ângulo de direção das rodas dianteiras do veículo	°
r_d	Raio de viragem do veículo para a direita	m
r_e	Raio de viragem do veículo para a esquerda	m

A velocidade longitudinal de referência é obtida a partir da distância percorrida pelo veículo e pelo tempo que demorou a realizar o percurso. Por forma a tornar mais simples e precisa a medição da distância percorrida, os testes de velocidade foram efetuados em linha reta.

O tempo que o veículo demorou a realizar o percurso foi obtido através do temporizador entre funções programadas no *arduino*. A leitura das rotações e velocidades formam temporizadas com um intervalo de 100ms. Dessa forma, através do número de leituras que o veículo produziu multiplicado pelo intervalo, pode-se obter o tempo do percurso.

As velocidades longitudinais das rodas são calculadas via software. Sabendo o raio das rodas e as rotações por minuto obtidos através dos sensores de velocidade, é possível calcular a velocidade longitudinal através da equação 3.3), estes valores são convertidos de m/s para km/h, para uma melhor compreensão. A tensão dos motores é medida entre o controlador e o motor, através de um multímetro. O ângulo de direção das rodas é o valor correspondente ao sinal de entrada no volante que um condutor pode originar. Através dos limites do ângulo de direção, pode-se obter os raios de viragem para a esquerda e direita.

4.1 Rotação, velocidade e aceleração

O primeiro grupo de testes incide no sinal de entrada que o condutor impõe no automóvel através do pedal do acelerador. Traduzindo para os motores elétricos, este comando será a alteração de voltagem imposta aos motores através do controlador que recebe via software um valor de PWM. Estes testes incidem na variação da modelação PWM com vista a obter várias velocidades, atestando o comportamento do veículo. A direção conforme referido anteriormente será de 90°, que corresponde às rodas alinhadas pelo chassis obtendo uma trajetória linear. Nestes vários testes serão também simuladas as várias velocidades segundo o modelo teórico da tese anterior. Os resultados serão apresentados em função do tempo.

Por forma a tornar os testes de velocidade o mais semelhante possíveis, foi definido um percurso de igual distância: aproximadamente 15 metros.

4.1.1 PWM de 40%

O primeiro valor de PWM foi de 40%, que corresponde a 1.76V de tensão aplicada do controlador aos motores, fazendo com que o VPE demorasse 11 segundos a percorrer a distância definida. Com base na distância percorrida, no tempo de viagem e no diâmetro da roda, foram calculados os seguintes valores de referência: velocidade angular (RPM), velocidade longitudinal (km/h) e aceleração (m/s²), como pode ser visto na tabela 10.

Tabela 10 – Valores de referência para um PWM de 40%

R_{xr}	432.37 RPM
V_{xr}	4.89 km/h
A_{xr}	0.12 m/s ²

Através das rotações por minuto e da velocidade longitudinal de cada roda fornecidos pelo software do VPE, durante os 11 segundos de percurso foi possível calcular o valor médio das rotações por minuto, a velocidade média longitudinal e a aceleração média das quatro rodas.

No gráfico da figura 35 estão representados os valores que serviram de base para o cálculo da média das rotações.

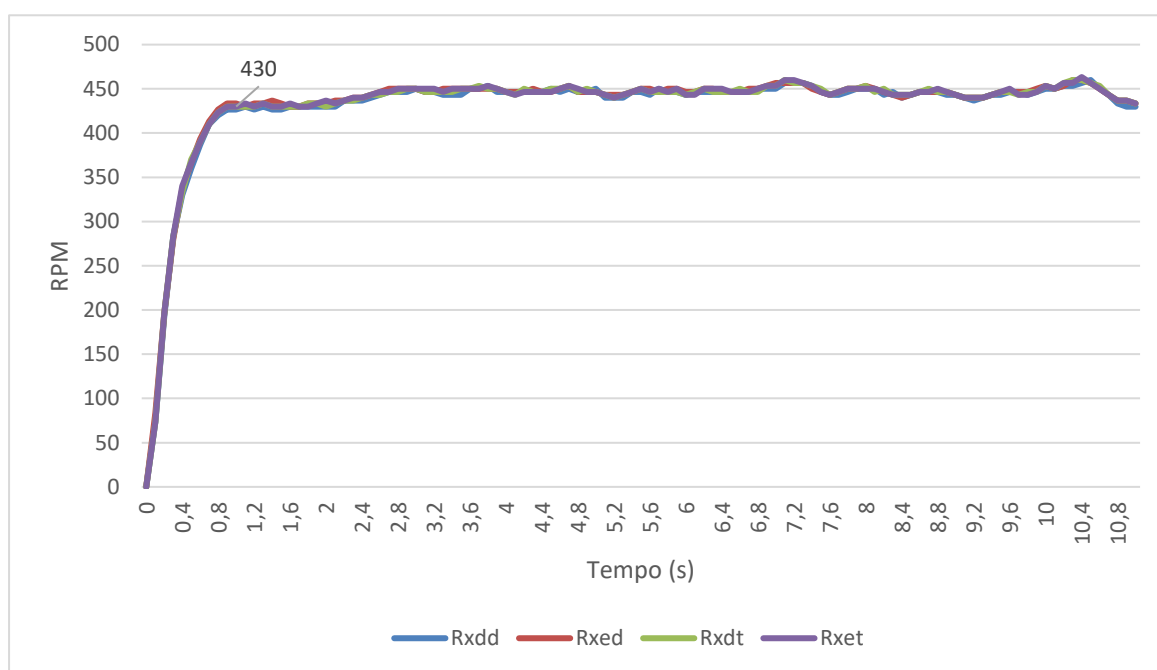


Figura 35 – RPM das rodas individualmente para PWM de 40%

Foi traçada uma média das rotações das quatro rodas e posteriormente calculada uma média geral. Desta forma, é possível obter um resultado comparativo com o valor de referência. O erro associado ao resultado da média calculada é baixo, devido às quatro rodas possuírem valores de rotação muito semelhantes conforme é apresentado no gráfico anterior. Verificou-se também que o VPE necessitou de apenas 0,9 segundos para atingir 430 RPM, valor que é muito aproximado do valor médio, demonstrado no gráfico da figura 36.

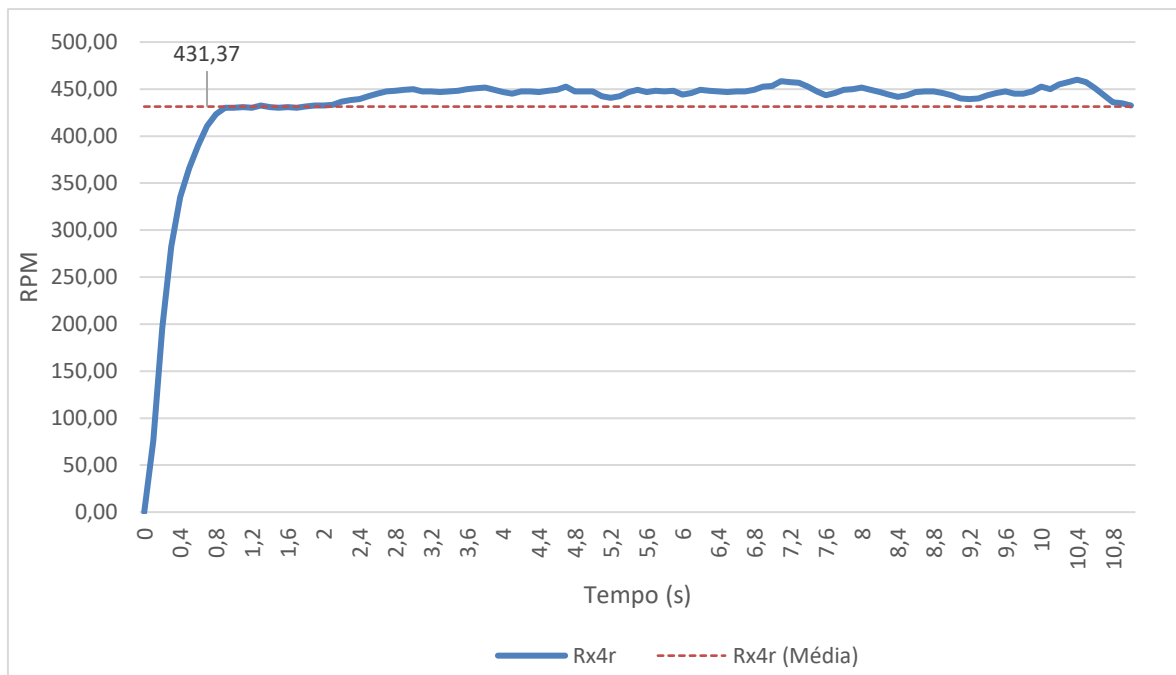


Figura 36 – Média da RPM das 4 rodas para PWM de 40%

Relativamente à velocidade, são apresentados resultados seguindo o mesmo procedimento do cálculo da rotação. O veículo atinge a velocidade de 4.86km/h a 0.9 segundos do arranque, conforme demonstrado no gráfico da figura 37.

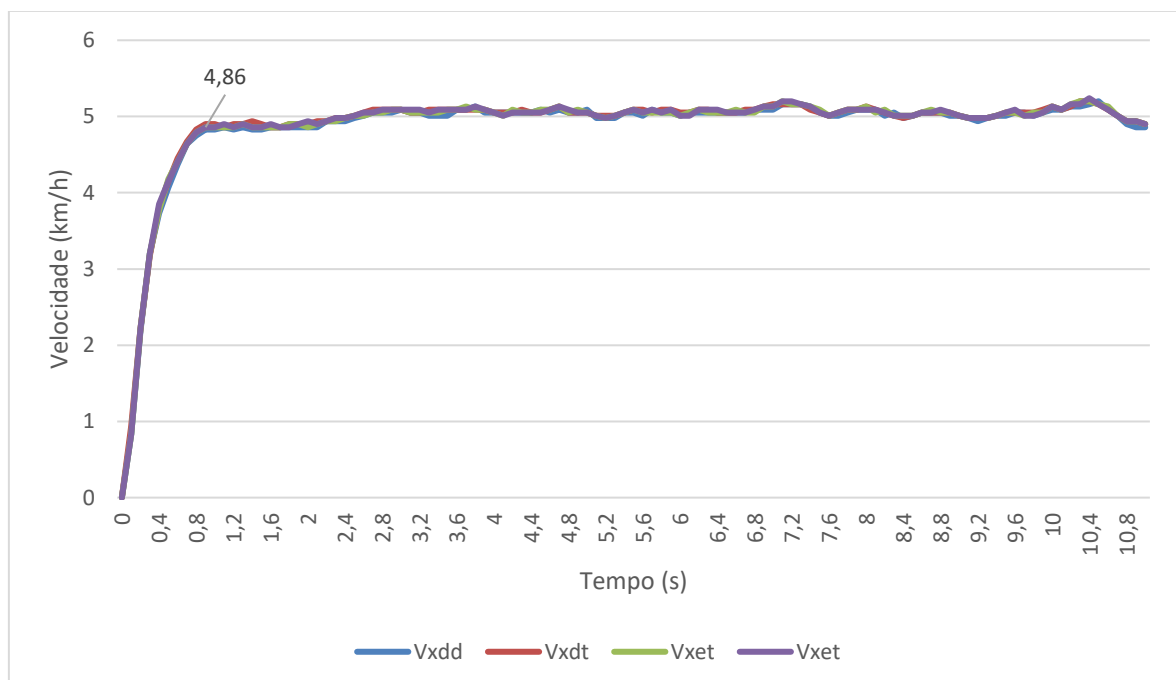


Figura 37 – Velocidade das rodas individualmente para um PWM de 40%

A partir da velocidade de cada roda foi calculada a aceleração, sendo possível demonstrar a variação da velocidade a que o VPE esteve sujeito, representado na figura 38.

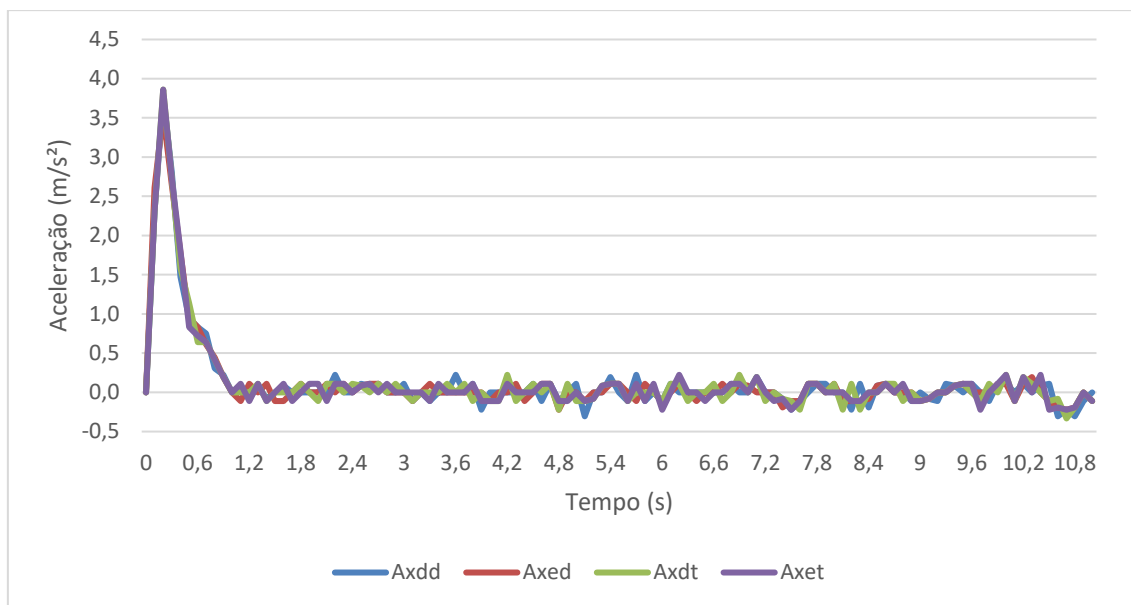


Figura 38 – Aceleração das rodas individualmente para um PWM de 40%

No gráfico 39 é apresentado o comportamento do VPE em termos de velocidade e aceleração:

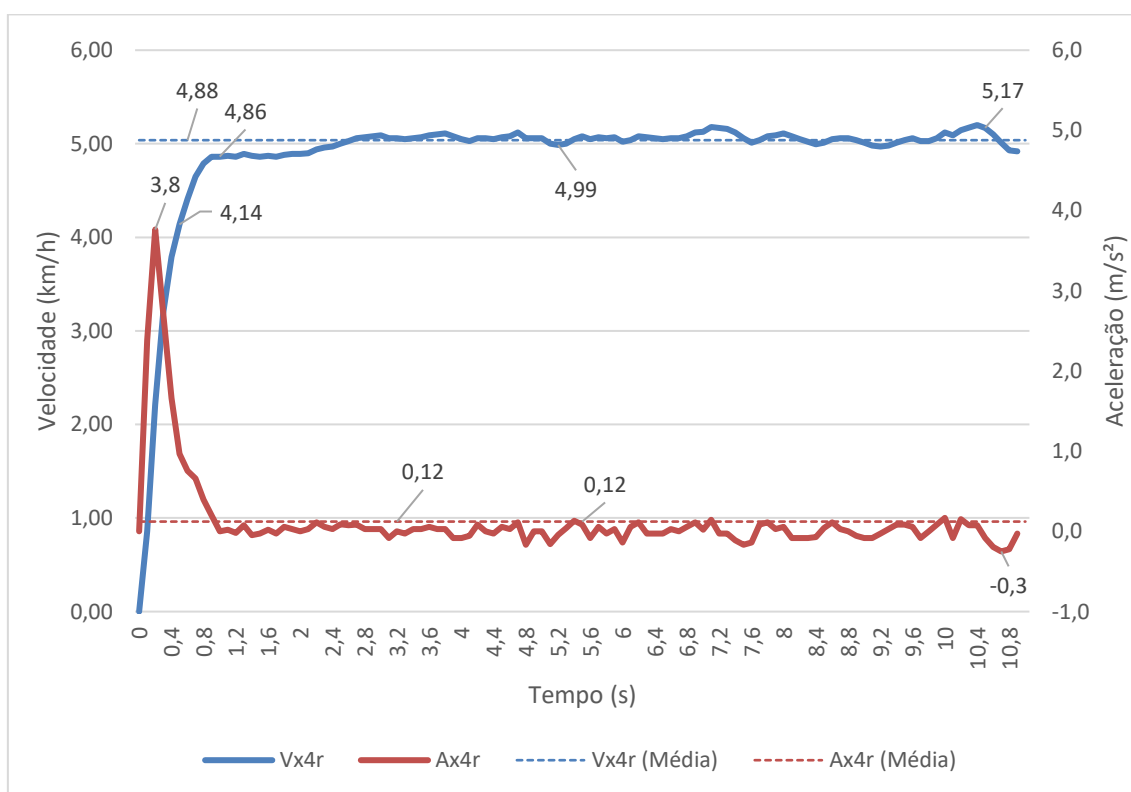


Figura 39 – Velocidade e aceleração média para um PWM de 40%

A aceleração dos vários motores é bastante semelhante até a obtenção da velocidade média, verificando-se que após atingida esta velocidade, o VPE produz uma oscilação na velocidade em 0,18 km/h e em 0,42 m/s^2 na aceleração. Inicialmente foi registado uma aceleração de 3,8 m/s^2 .

Com base nos resultados da figura anterior foram determinados os valores médios da velocidade (4,88 km/h) e da aceleração (0,12 m/s^2), para uma melhor comparação com os valores de referência.

Através do modelo teórico foi simulada a velocidade máxima para um PWM de 40%, que corresponde a uma tensão de 1.76V aplicado aos quatro motores elétricos, em função do tempo para uma trajetória retilínea e sem qualquer tipo de controlador. No gráfico da figura 40, são apresentados os resultados de ambos os modelos.

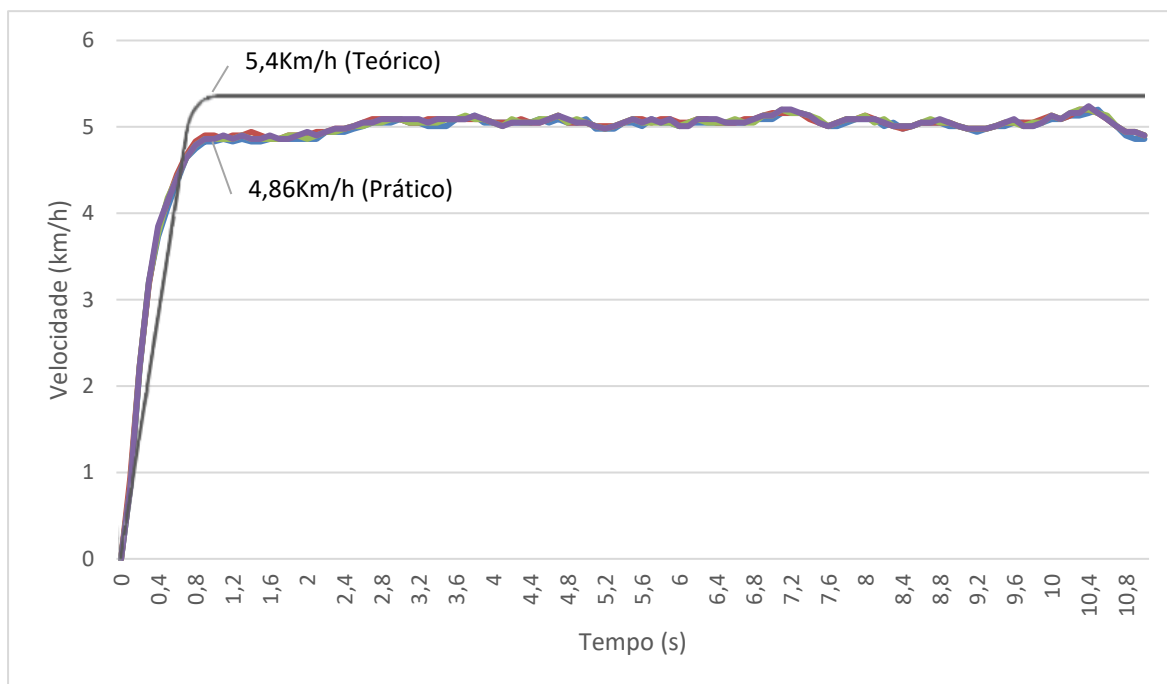


Figura 40 – Comparação da velocidade dos modelos teórico e prático para um PWM de 40%

O veículo atingiu uma velocidade máxima de 5.4Km/h em aproximadamente 0.8 segundos. Estes valores não correspondem exatamente aos valores obtidos no modelo prático, mas satisfatoriamente são valores aproximados. Verifica-se ainda que as velocidades de todas as rodas são coincidentes e constantes após atingida a velocidade máxima, ao contrário do teste prático em que mesmo sendo motores com características semelhantes, verificam-se pequenas alterações nas velocidades entre os quatro motores e com tendência a um ligeiro aumento da velocidade máxima ao longo do tempo.

4.1.2 PWM de 60%

Foi testado o comportamento do VPE em termos de rotação, velocidade e aceleração para um PWM superior. Neste caso foi aplicado um PWM de 60%, que se traduz em 2.7V nos motores, levando o VPE a perfazer os 15 metros em 6.7 segundos.

Com base nestes dados foram calculados os valores de referência, representados na tabela 11:

Tabela 11 – Valores de referência para um PWM de 60%

R_{xr}	710 RPM
V_{xr}	8.03 km/h
A_{xr}	0.33 m/s ²

À semelhança do teste anterior, representado na figura 41, foram obtidos valores médios de rotações das várias rodas. Os motores não diferem muito em termos de rotações, mesmo para um PWM superior.

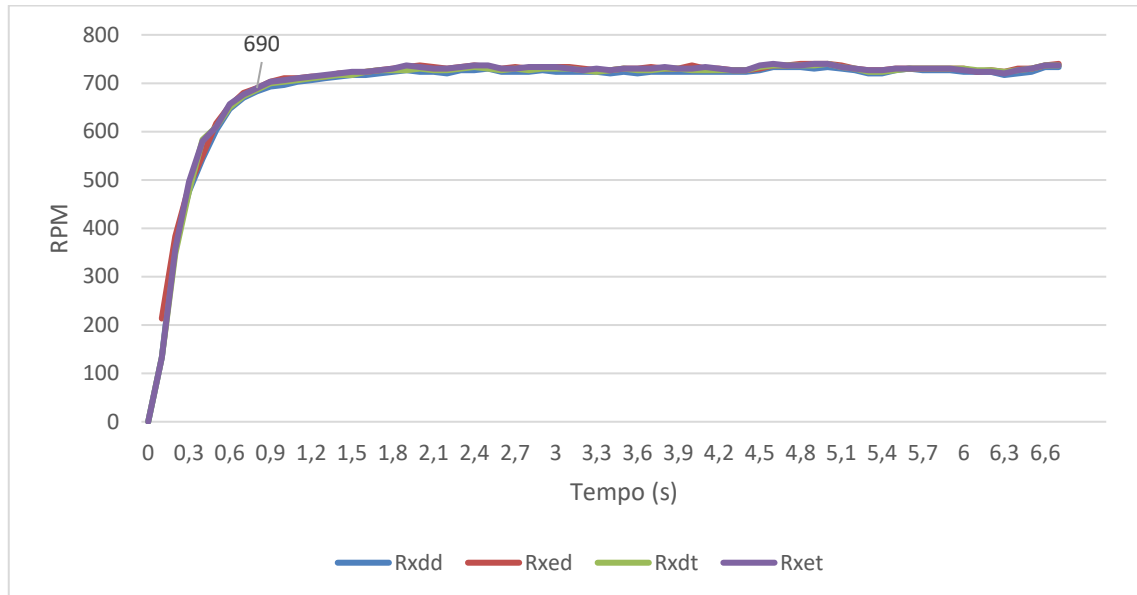


Figura 41 – RPM das rodas individualmente com PWM de 60%

Na figura 42, está a média da RPM das 4 rodas para PWM de 60%.

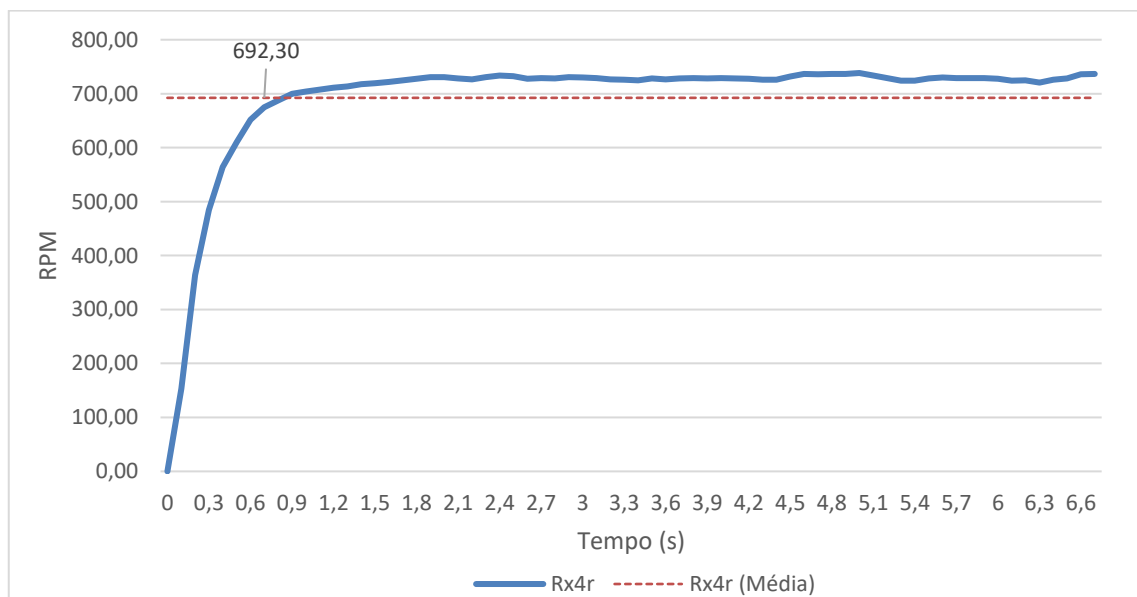


Figura 42 – Média da RPM das 4 rodas para PWM de 60%

O valor médio das rotações por minuto obtido foi de 692.30 RPM e o VPE demorou cerca de 0.8 segundos para atingir este valor, como pode ser visto na figura 43.

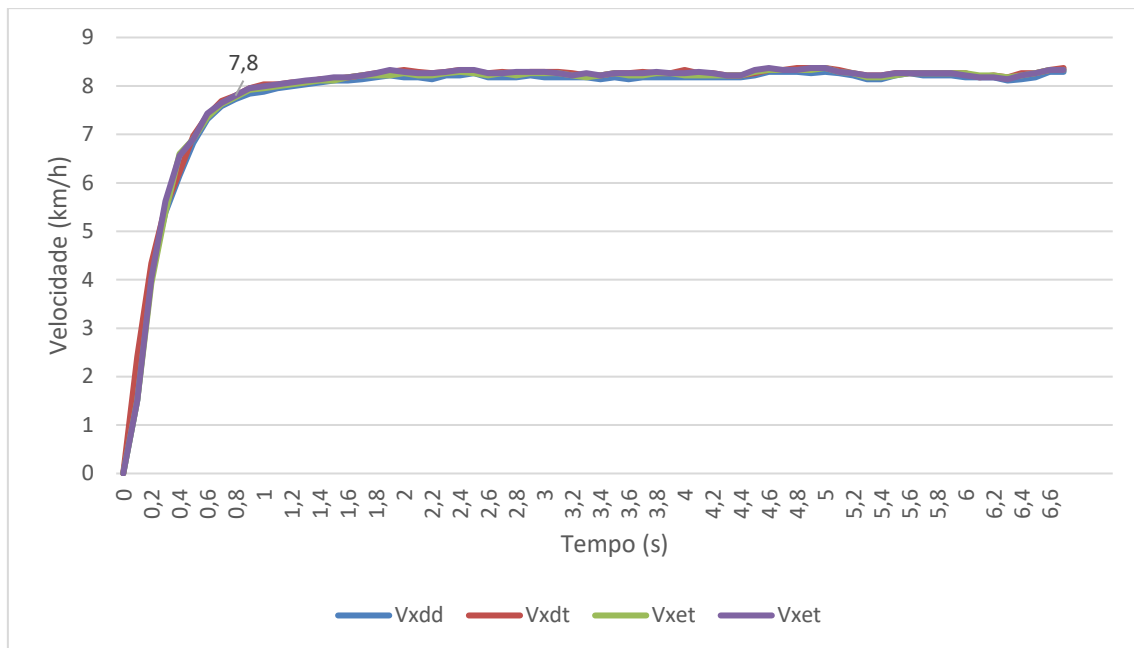


Figura 43 – Velocidade das rodas individualmente para um PWM de 60%

Na figura 44 está representada a aceleração das rodas individualmente para um PWM de 60%.

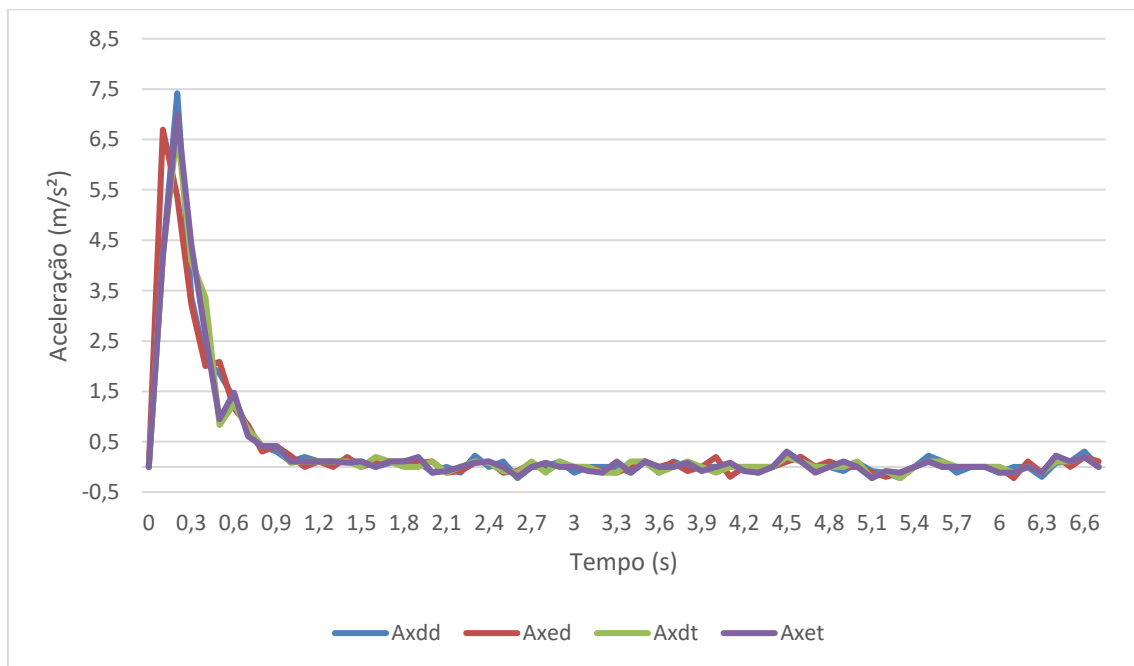


Figura 44 – Aceleração das rodas individualmente para um PWM de 60%

Na figura 45 está representada a velocidade média e a aceleração média para um PWM de 60%.

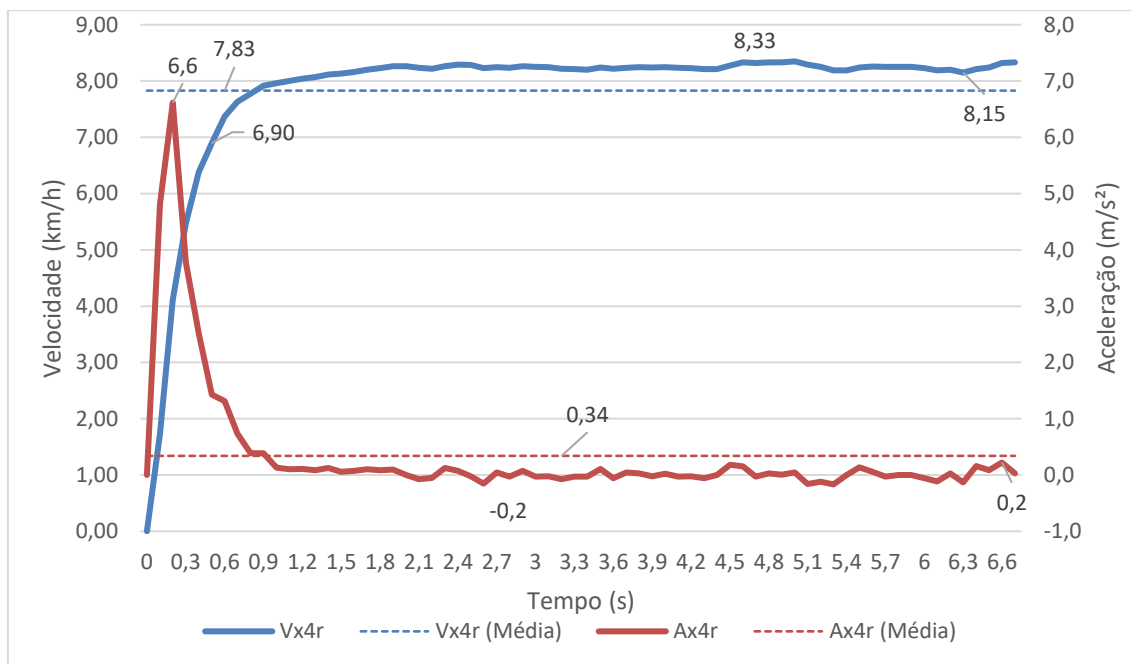


Figura 45 – Velocidade e aceleração média para um PWM de 60%

Aos 0.8 segundos foi registado a velocidade de 7.8km/h, valor muito próximo do valor médio calculado. Em relação ao teste anterior não foram registadas alterações significativas das variações da velocidade e da aceleração após a velocidade ter estabilizado. Ao contrário do teste anterior, na aceleração individual dos motores foi verificado uma maior variação dos valores máximos de aceleração em cerca de 2m/s².

A figura 46 resulta da simulação do VPE no modelo teórico para um PWM de 60%, correspondente a uma tensão de 2.7V aplicado aos quatro motores elétricos.

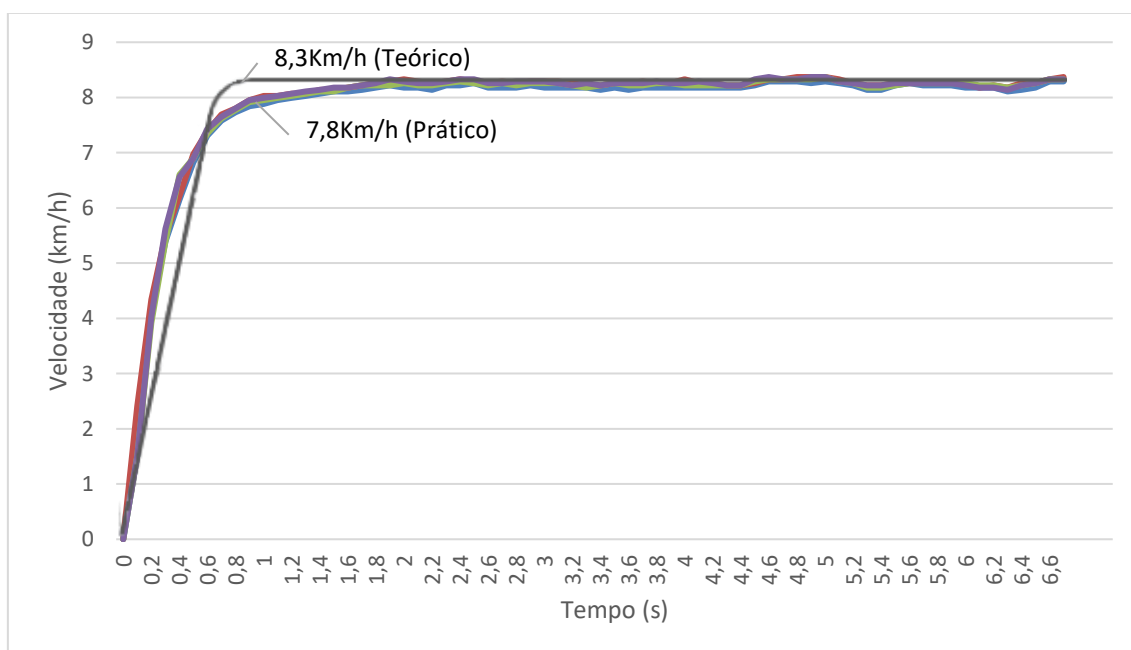


Figura 46 – Comparação da velocidade dos modelos teórico e prático para um PWM de 60%

Neste teste a velocidade máxima obtida foi de 8.3km/h em 0.8 segundos, revelando uma crescente aproximação aos resultados práticos, comparativamente aos testes com o PWM de 40%. Através da figura anterior, pode-se verificar que o VPE chegou a atingir a velocidade do teste teórico.

4.1.3 PWM de 80%

Por último, foi realizado o teste com um PWM de 80%, que se traduz em 3.65V nos motores, levando o VPE a percorrer os 15 metros em 4.7 segundos.

Com base nestes dados foram calculados os seguintes valores de referência, representados na tabela 12:

Tabela 12 – Valores de referência para um PWM de 80%

R_{xr}	1015 RPM
V_{xr}	11.48 km/h
A_{xr}	0.68 m/s ²

Comparativamente ao teste com PWM de 60%, a rotação média das rodas foi verificada no mesmo tempo: 0.8 segundos, como representado na figura 47.

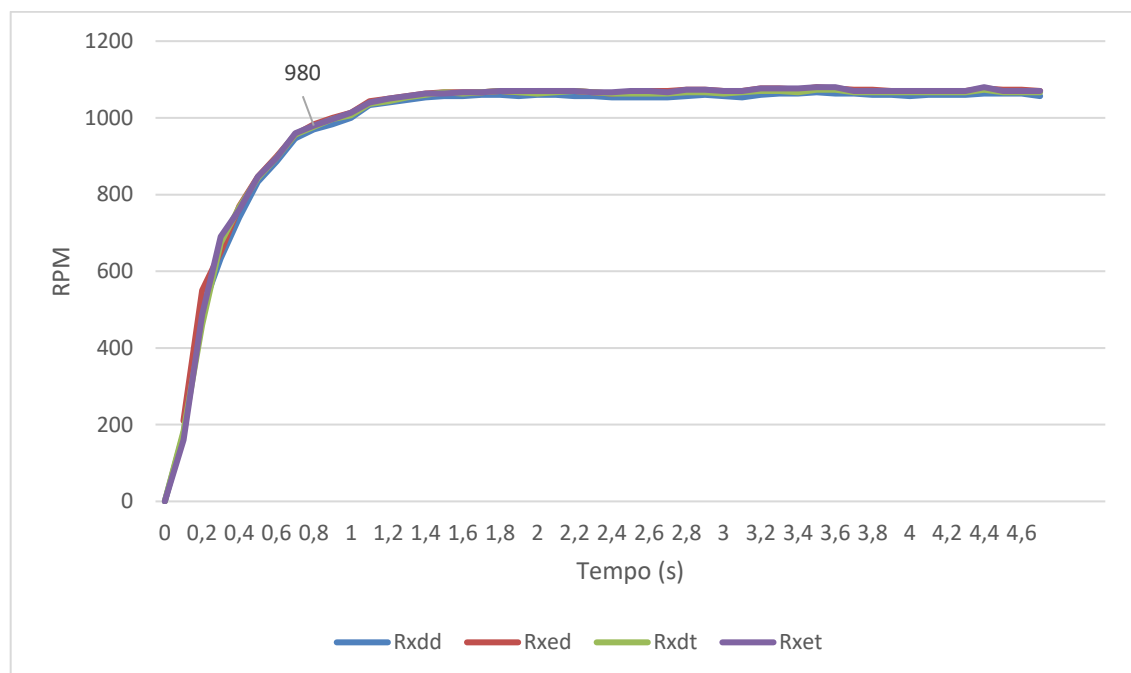


Figura 47 – Rotação das rodas individualmente para um PWM de 80%

Mais uma vez foi verificado a semelhança dos quatro motores em termos de rotação. O tempo de elevação da rotação permanece muito semelhante aos testes anteriores. Na figura 48, está representada a média da RPM das 4 rodas para PWM de 80%.

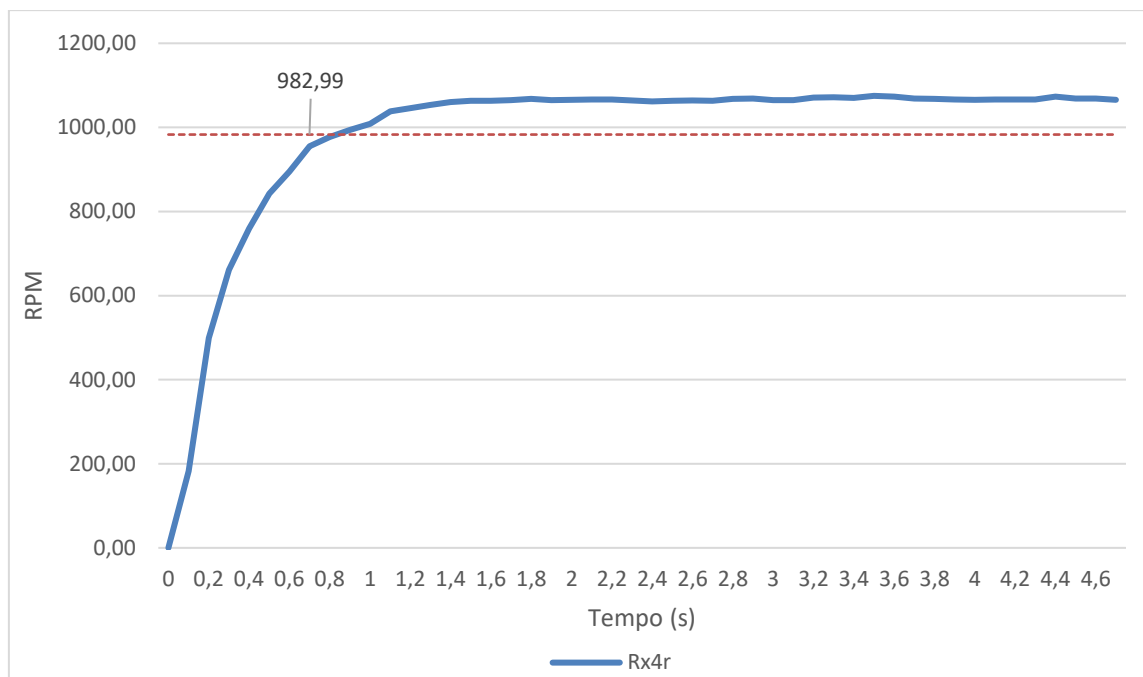


Figura 48 – Média da RPM das 4 rodas para PWM de 80%

Na figura 49, está representada a velocidade das rodas individualmente para um PWM de 80%.

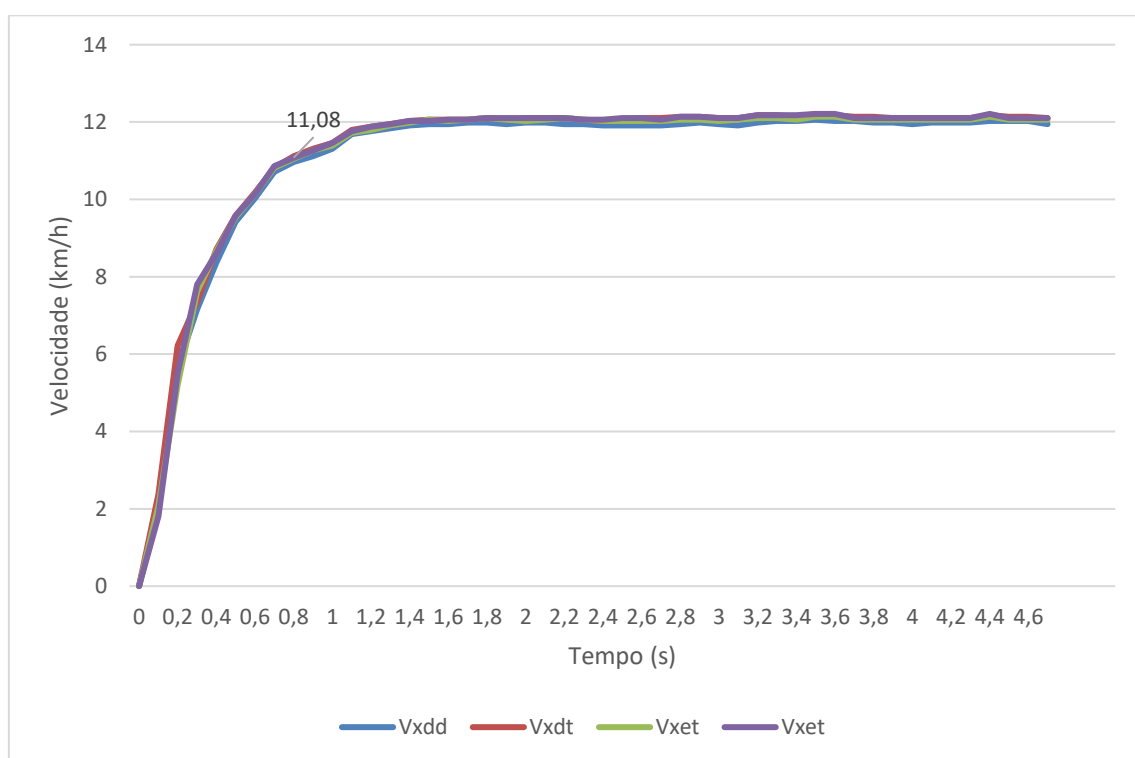


Figura 49 – Velocidade das rodas individualmente para um PWM de 80%

Na figura 50, está representada a aceleração das rodas individualmente para um PWM de 80%.

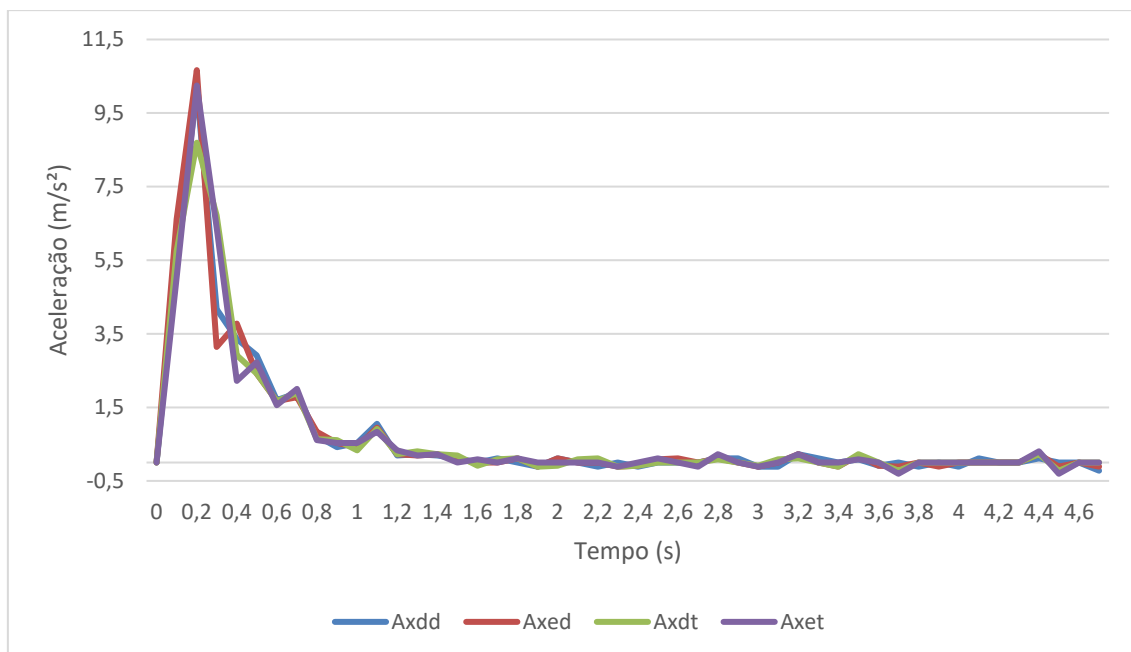


Figura 50 – Aceleração das rodas individualmente para um PWM de 80%

Na figura 51, está representada a velocidade e aceleração média para um PWM de 80%.

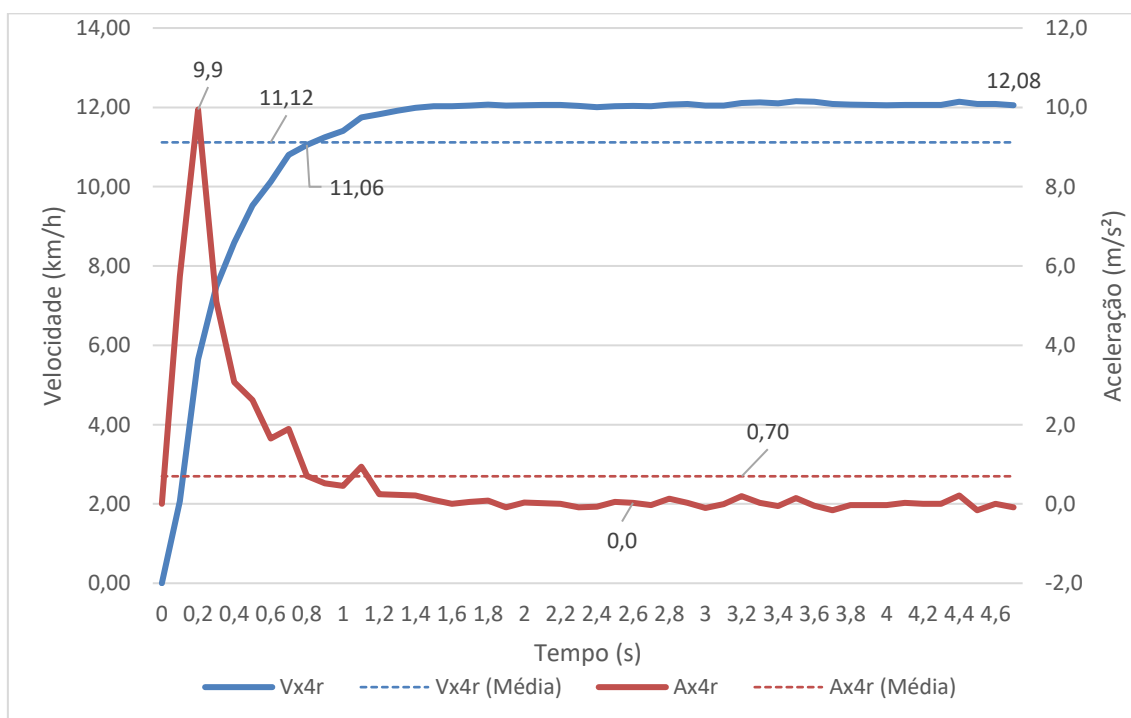


Figura 51 – Velocidade e aceleração média para um PWM de 80%

Aos 0,8 segundos foi registado a velocidade de 11,06km/h, valor muito próximo do valor médio calculado, 11,12km/h. A velocidade máxima registada foi de 12,08km/h e a aceleração máxima foi de 9,9m/s². Em relação ao PWM anterior, não foram registadas alterações significativas das variações da velocidade e da aceleração após a velocidade ter estabilizado.

A figura 52 resulta da simulação do VPE no modelo teórico para um PWM de 80%, correspondente a uma tensão de 3,65V aplicado aos quatro motores elétricos.

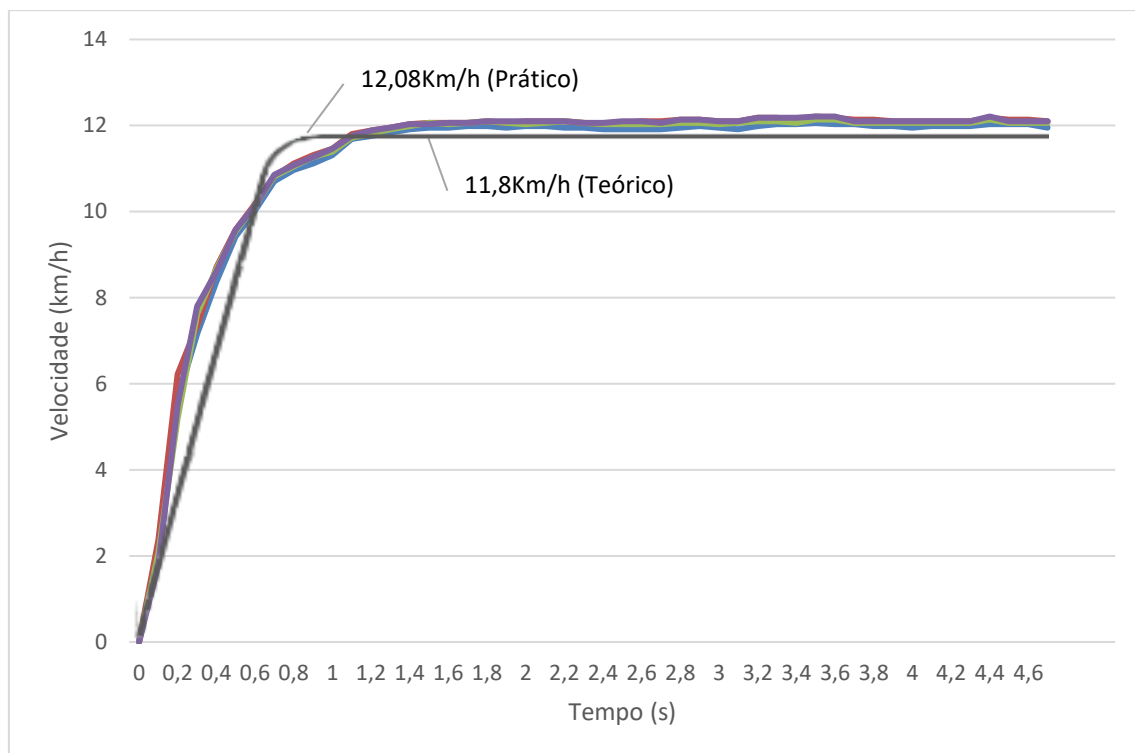


Figura 52 – Comparação da velocidade dos modelos teórico e prático para um PWM de 80%

Verificou-se pela primeira vez, que a velocidade máxima atingida pelo modelo teórico é inferior à velocidade atingida pelo VPE nos testes práticos. O tempo necessário para atingir a velocidade máxima permanece inalterada, já nos testes práticos o VPE necessita do dobro do tempo, como se pode ver nas tabelas 13 e 14.

Tabela 13 – Comparativo entre valores de referência e os valores práticos do VPE para os vários PWM

PWM	R_{xr}	R_{x4r} (média)	V_{xr}	V_{x4r} (média)	A_{xr}	A_{x4r} (média)
40%	432.37	431.37	4.89	4.88	0.12	0.12
60%	710	692.30	8.03	7.83	0.33	0.34
80%	1015	982.99	11.48	11.12	0.68	0.70

Tabela 14 – Comparativo entre velocidades máximas nos testes práticos e teóricos para os vários PWM

PWM	$V_{m\acute{a}x}$ prático	$V_{m\acute{a}x}$ teórico
40%	5.17	5.40
60%	8.33	8.30
80%	12.08	11.80

4.2 Velocidade máxima

A determinação da velocidade máxima implica aplicar ao VPE o PWM máximo, que corresponde a 5VDC de tensão aplicada aos motores, numa trajetória retilínea. O teste foi efetuado nas mesmas condições que os anteriores, ou seja, no mesmo local e num percurso de 15 metros. O VPE com o PWM máximo completa o percurso definido em 3.6 segundos. Na figura 53 pode-se verificar que o veículo na sua aceleração máxima demorou cerca de 2.9 segundos a atingir 15.58km/h.

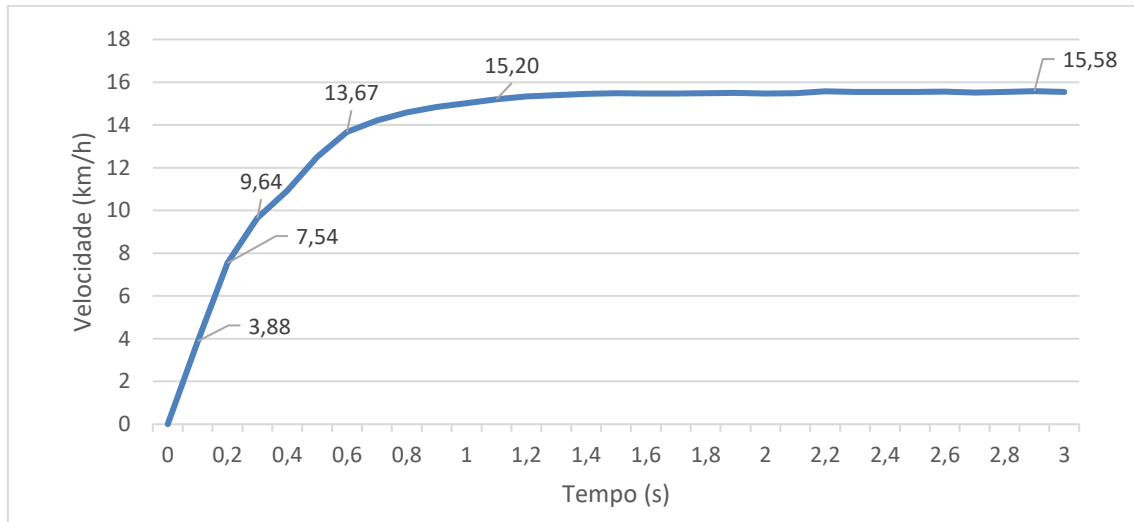


Figura 53 – Velocidade máxima

A velocidade máxima foi registada já numa situação em o veículo se encontrava nos limites de potência. Por este motivo, é apresentado um gráfico com a relação entre o tempo e percentagem da velocidade máxima, para melhor compreensão da curva de velocidade que um veículo elétrico pode reproduzir, que está representado na figura 54.

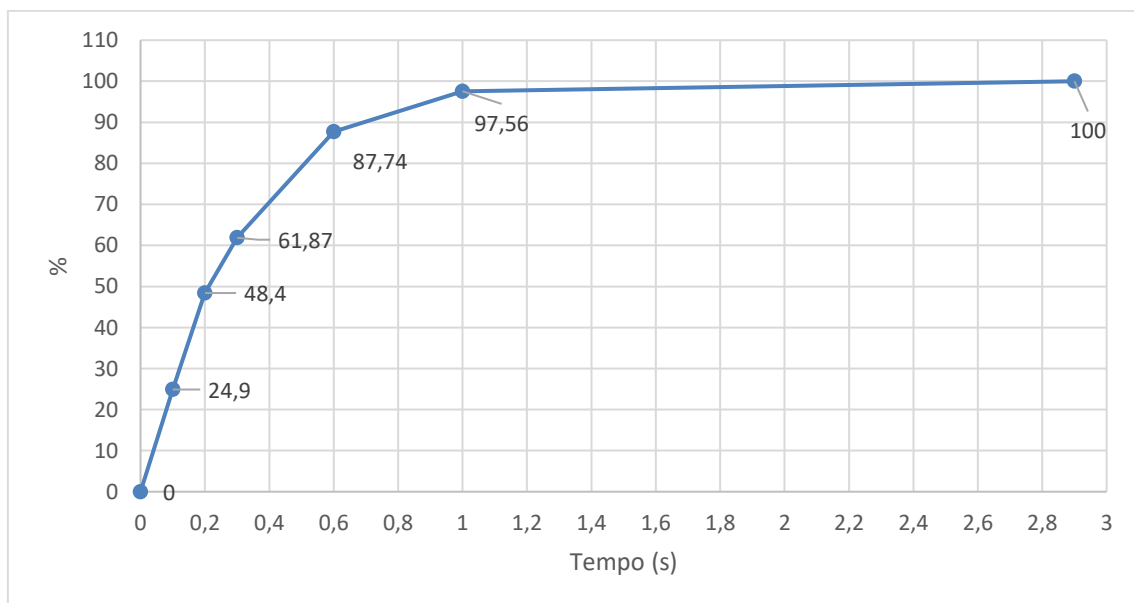


Figura 54 – Evolução da velocidade em relação à velocidade máxima

Através da análise do gráfico anterior, verifica-se que o veículo na primeira décima de segundo já possui cerca de um quarto da velocidade máxima, começando a cair nas décimas de segundo

seguintes. O declive da curva vai baixando à medida que a velocidade aumenta, levando mais tempo para elevar a velocidade. Isto deve-se ao decréscimo do binário do motor desde o arranque até ao limite da potência máxima, conforme é indicado pelo fornecedor dos motores usados e exemplificado na figura 14.

A simulação do modelo teórico para a obtenção da velocidade máxima do VPE, numa trajetória retilínea é demonstrada no gráfico da figura 55.

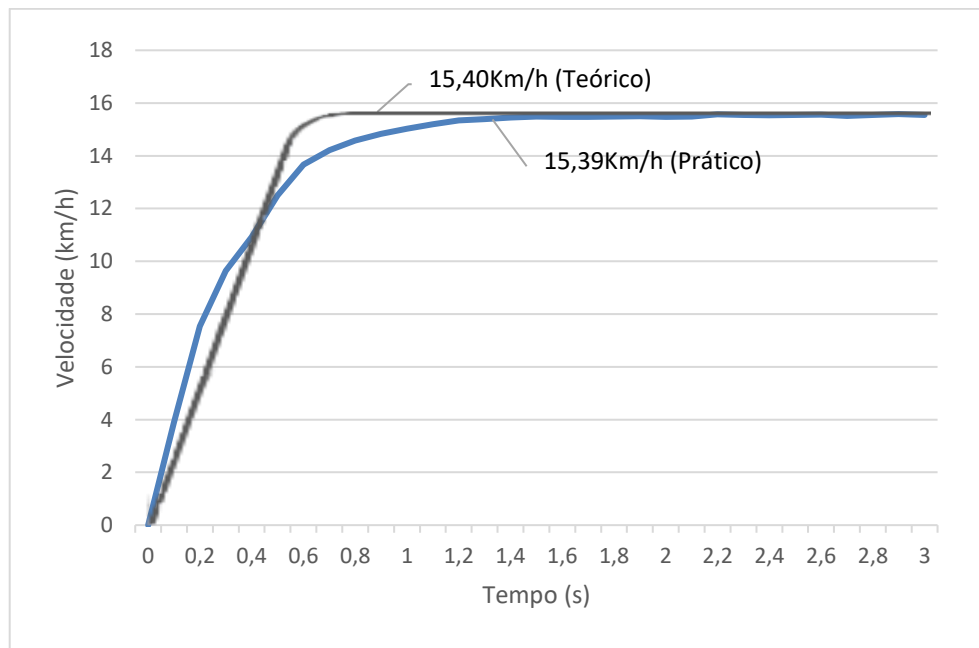


Figura 55 – Comparação da velocidade dos modelos teórico e prático para um PWM de 100%

O resultado da velocidade máxima é excelente, visto se encontrar muito próximo do valor obtido pelo VPE, o que revela que os parâmetros calculados e o modelo teórico foram bem desenvolvidos. O mesmo não acontece no tempo que o VPE demora a atingir a velocidade máxima, registando-se neste caso um valor de 0,8 segundos, face ao valor de 2,6 segundos obtido pelo VPE no teste prático.

4.3 Aceleração máxima

A aceleração máxima foi obtida com uma modelação PWM no máximo de amplitude. A aceleração máxima registada foi de $10,8\text{m/s}^2$ e vai baixando à medida que a velocidade máxima é alcançada.

Na figura 56 são apresentados os resultados da aceleração máxima dos modelos teórico e prático, numa trajetória retilínea.

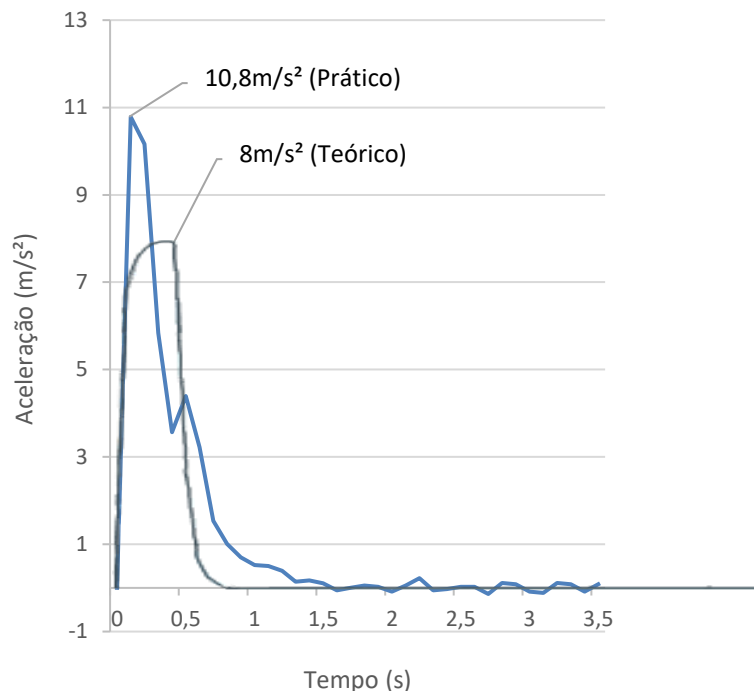


Figura 56 – Comparação da aceleração máxima dos modelos teórico e prático

No modelo teórico verifica-se uma aceleração inferior em relação ao modelo prático. O tempo de aceleração de ambos os modelos é de 1 segundo aproximadamente. Após a estabilização da velocidade, verifica-se no modelo teórico uma aceleração constante de valor igual a 0 e no modelo prático uma aceleração a variar entre -0.2 e 0.2m/s².

4.4 Diâmetro de viragem

O raio de viragem é um fator determinante na manobrabilidade de um automóvel. Por isso, foi realizado um teste com o objetivo de obter os limites da direção do VPE.

Para o cálculo do raio de viragem foi executado o seguinte procedimento:

- Posicionou-se a lateral esquerda do VPE paralelamente a uma linha;
- Aplicou-se um ângulo de 180° ao servomotor, que corresponde à deslocação da direção para o lado direito;
- O VPE descreveu uma trajetória de 180° até se posicionar em paralelo com a linha do ponto de partida;
- Medição da distância entre linha do ponto de partida e a lateral interior ao VPE;
- Seguir o procedimento anterior, mas com trajetória contrária e direção para o lado esquerdo, que corresponde a -180° no servomotor.

Nos gráficos seguintes são apresentadas as trajetórias que o VPE descreveu, com vista a determinar os dois diâmetros de viragem.

Para uma trajetória para a direita o diâmetro de viragem obtido foi de 0.84 metros e para a esquerda foi de 0.78 metros, representados nas figuras 57 e 58, respetivamente.

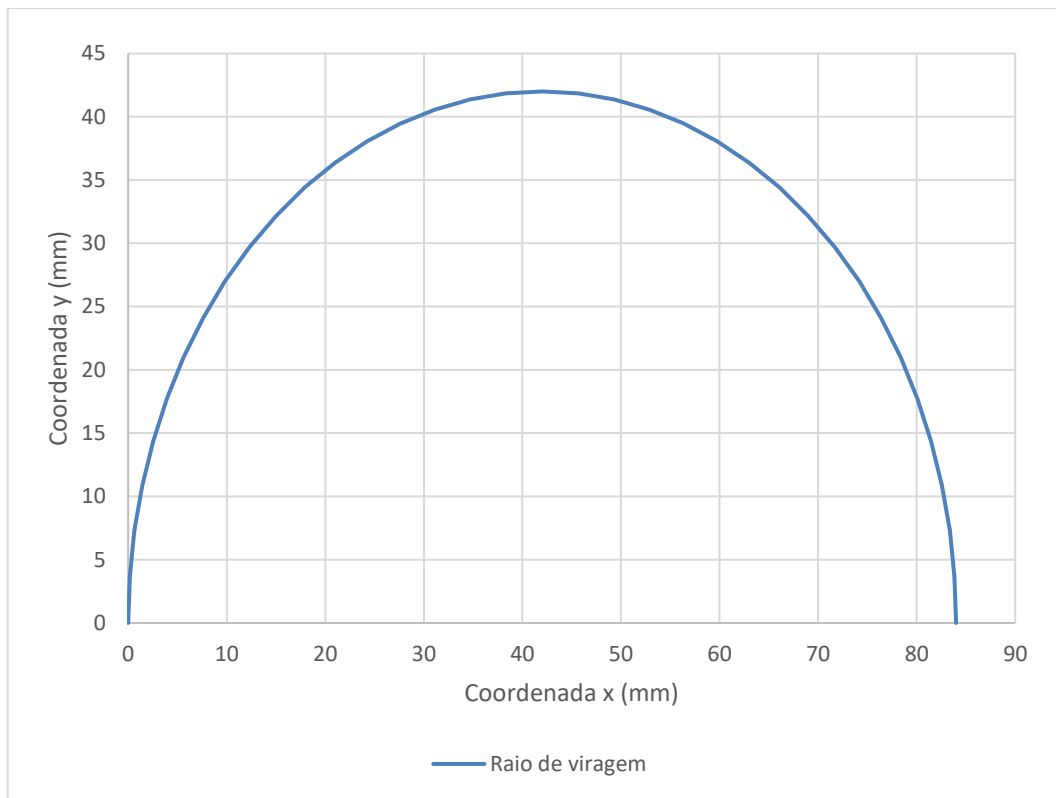


Figura 57 – Diâmetro de viragem para a direita

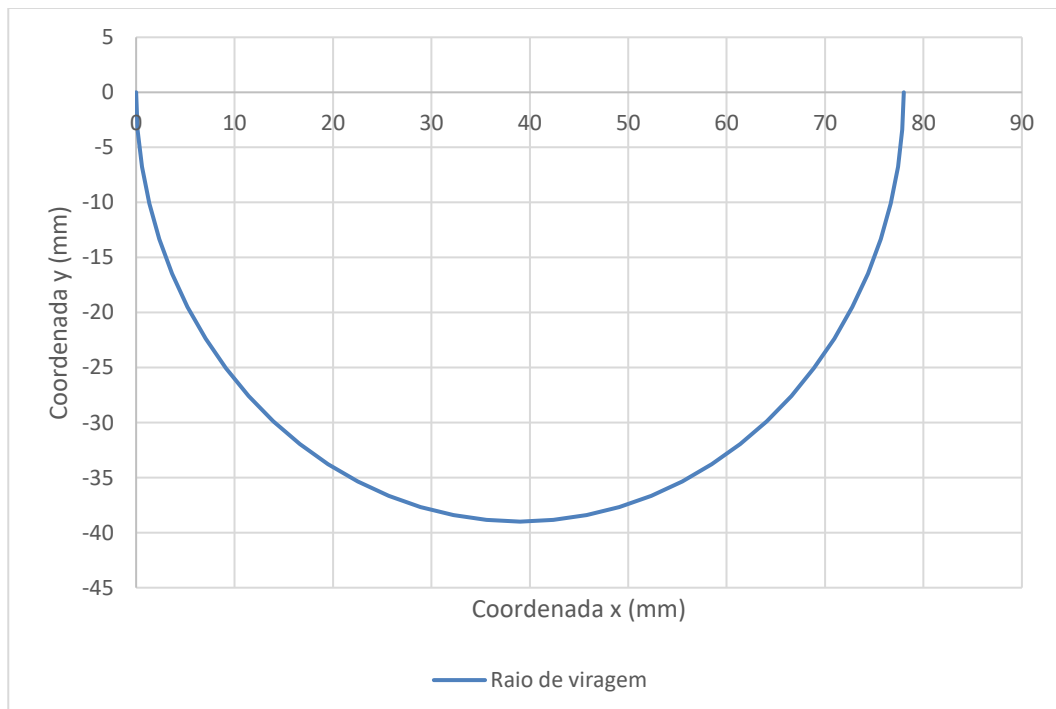


Figura 58 – Diâmetro de viragem para a esquerda

Analisando os gráficos, conclui-se que os diâmetros de viragem são diferentes, para as mesmas condições dos testes. Esta discrepância dos resultados, deve-se à diferença da distância entre o servomotor a cada uma das rodas, como se pode ver na figura 59.

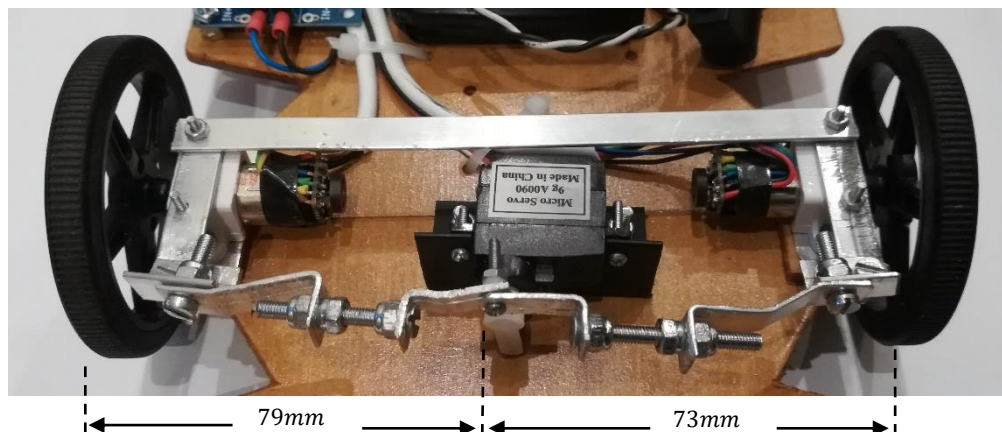


Figura 59 – Distâncias entre o servomotor e as rodas frontais

A construção do VPE teve por base um veículo à escala de $\frac{1}{14}$, conforme referido em 3.1.1. Logo, assumindo que o diâmetro de viragem do VPE será a média entre os dois resultados, pode-se obter a seguinte comparação com o veículo real, como está representado na tabela 15.

Tabela 15 - Comparação do raio de viragem entre o VPE e o veículo real

Diâmetro de viragem	
Veículo real	10.7 metros
VPE	11.3 metros

5. Conclusão e trabalho futuro

A construção do veículo de pequena escala teve por base uma réplica de um veículo real. Apesar de existirem desvios da réplica em relação à escala referida pelo fabricante (tabela 1), os parâmetros mais importantes para o cumprimento dos objetivos possuem maior exatidão, como é o caso da distância entre eixos, distância entre rodas e comprimento total do veículo.

O desenvolvimento de um modelo 3D do VPE, para além de ter contribuído para uma melhor construção do protótipo, representa o ponto de partida para o aperfeiçoamento de próximas plataformas. A indústria automóvel está em constante evolução, o que leva naturalmente à necessidade de aumento da segurança e criação de veículos com novas formas de propulsão, exigindo modelos de teste mais evoluídos. Por estes motivos a modelação 3D desempenha um papel muito importante no desenvolvimento deste tipo de plataformas. Outra vantagem da modelação 3D será a possibilidade da criação de peças através da impressão 3D.

Um dos principais objetivos deste trabalho foi a construção de um modelo semelhante a um veículo real, que permitisse a realização de testes da indústria automóvel. Foi demonstrado que, através da realização de ajustes na plataforma, é possível assemelhar o VPE a modelos reais com precisão e desta forma recolher dados muito mais próximos da realidade. A parametrização para adequação à escala foi cumprida, com exceção dos coeficientes de desliz, que representam um fator importante na segurança automóvel. Ainda assim o trabalho desenvolvido no curso desta dissertação permitiu o desenvolvimento físico de uma plataforma elétrica de tração às quatro rodas, capaz de dar resposta aos mais diversos tipos de desafios e problemas enfrentados pela indústria automóvel.

Assegurada a possibilidade de o VPE se assemelhar a veículos de grande escala, surge a necessidade de avaliar os valores obtidos. Para isso, foram definidos vários testes de velocidade, com trajetória linear e para uma distância de 15 metros. Sabendo o tempo de viagem, foram calculados os valores de referência que servem de comparação com os valores registados pelo VPE. Com base nos resultados obtidos na tabela 12, pode-se concluir que os dados do VPE são fidedignos, visto não apresentarem grandes diferenças em relação aos dados de referência. Verificou-se um ligeiro aumento da diferença à medida que a velocidade aumenta. Isto deve-se ao menor número de leituras que o VPE produz, fazendo com que os valores do arranque tenham uma maior influência nos valores médios obtidos. Os resultados podem ser melhorados, aumentando a distância do percurso e diminuindo o tempo entre leituras. Em todos os testes de velocidade, ficou demonstrado o elevado binário disponível logo no arranque que o motor elétrico possui, permitindo o alcance da velocidade desejada num período muito reduzido. Ficou patente também no teste da aceleração máxima no ponto (4.3) o elevado poder de aceleração que um veículo elétrico de pequena escala com tração às quatro rodas pode originar, neste caso atingiu uma aceleração superior a 1G.

Relativamente aos testes de velocidade e aceleração através do modelo teórico, por análise da tabela 13 e dos pontos 4.2 e 4.3, pode-se concluir que os valores de velocidade são semelhantes aos valores obtidos através do modelo prático. Em termos de tempo necessário para a obtenção das velocidades máximas, ambos os modelos obtiveram resultados também aproximados. Apenas foram simuladas as velocidades e aceleração máxima para uma trajetória retilínea e sem qualquer tipo de sistema de controlo, visto nesta dissertação não terem sido implementados algoritmos de controlo.

Em 4.4 foi testado o ângulo de viragem máximo para a direita e para esquerda que o VPE permite. Em comparação com o veículo real à escala, verifica-se que não existe uma elevada diferença, mas esta pode ser reduzida ou até mesmo ampliada, se aumentar o comprimento da peça que está conectada ao eixo do servomotor (figura 59).

Na configuração de um veículo elétrico de tração às quatro rodas, com a particularidade de cada roda ser controlada por um motor elétrico independente, foi demonstrada a sua viabilidade em termos de condução, apesar de terem sido observadas alguns desvios de rota durante os testes. Estes desvios devem-se às diferenças em termos de rotação de cada motor. Mesmo sendo motores com características iguais, estes produzem comportamentos ligeiramente diferentes, obrigando à presença para este tipo de tipologia de um controlador de velocidade PID (2.6) para cada motor. Desta forma seriam garantidas velocidades mais aproximadas em todos os motores.

Os objetivos propostos inicialmente foram cumpridos, revelando que este tipo de plataforma de testes em pequena escala é uma mais valia na indústria automóvel, devido ao seu baixo custo, simplicidade, segurança na realização de testes, facilidade na implementação de algoritmos e à possibilidade de repetibilidade dos testes.

Esta investigação merece ser continuada, devido à necessidade de acrescentar subsistemas que são importantes na semelhança do modelo automóvel real. Por este motivo, são propostas algumas sugestões para o desenvolvimento do VPE.

Um sistema de elevada importância é a suspensão em cada roda, que possibilita o estudo de transferências de cargas durante as manobras e o acrescento de forças que até agora não foram consideradas, tornando o modelo mais próximo da realidade.

Criação de um sistema que permita o cálculo dos coeficientes de desliz, sendo estes parâmetros preponderantes no desempenho automóvel. O conhecimento destes coeficientes é também essencial nos testes de segurança automóvel.

Implementação do controlador de velocidade PID para o controlo da velocidade de cada roda, para a resolução do problema observado no desvio da trajetória do VPE e para a introdução dos algoritmos dos sistemas de segurança descritos em (2.4).

O controlo do VPE funciona através do envio de duas variáveis: velocidade e direção, por uma linha de comandos, impossibilitando manobras progressivas e rápidas alterações de estado. Um sistema proposto para o controlo livre do VPE será através de um comando por radiofrequência, à semelhança de outros veículos telecomandados.

Aplicação do modelo 3D para a criação de peças através da impressão 3D, permitindo a substituição de componentes, aperfeiçoamento do VPE e redução de mão-de-obra.

Por último, a forma como foi contruído esta plataforma fornece um ponto de partida para criação de um kit de desenvolvimento, com o intuito de evoluir para ser usado como uma ferramenta no desenvolvimento da segurança na indústria automóvel.

6. Bibliografia

- [1] Eckermann E. World history of the automobile [Internet]. Society of Automotive Engineers; 2001 [cited 2018 Jul 24]. 371 p. Available from: https://books.google.pt/books/about/World_History_of_the_Automobile.html?id=yLZeQwqNmdgC&redir_esc=y
- [2] U.S. Energy Information Administration (EIA). International Energy Outlook, Report No.: DOE/EIA-0484(2013). Office of Energy Analysis, editor. Washington, DC: U.S. Department of Energy; 2013.
- [3] Richardson DB. Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, Impacts, and renewable energy integration. *Renew Sustain Energy Rev.* 2013;19:247–54.
- [4] Tan KM, Ramachandaramurthy VK, Yong JY. Integration of electric vehicles in smart grid: A review on vehicle to grid technologies and optimization techniques. *Renew Sustain Energy Rev.* 2016;53:720–32.
- [5] Yong JY, Ramachandaramurthy VK, Tan KM, Mithulananthan N. A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renew Sustain Energy Rev.* 2015;49:365–85.
- [6] Witaya W, Parinya W, Krissada C. Scaled vehicle for interactive dynamic simulation (SIS). 2008 IEEE Int Conf Robot Biomimetics, ROBIO 2008. 2008;554–9.
- [7] Li Zhou Zhuo Ping Yu LX. A research on Anti-slip regulation for 4WD electric vehicle with In-wheel motors. *Appl Mech Mater.* 2013;34:753–7.
- [8] Schaltz E. Electrical Vehicle Design and Modeling. In: Soylu S, editor. *Electric Vehicles - Modelling and Simulations*. InTech; 2011. p. 64.
- [9] Vepachedu S. The History of the Electric Car. *Andhra J Ind News.* 2017;160.
- [10] Berman B. History of Hybrid Vehicles [Internet]. [cited 2018 Aug 15]. Available from: <https://www.hybridcars.com/history-of-hybrid-vehicles/>
- [11] Grover S. Government mandate: EV chargers as standard in new UK homes | TreeHugger [Internet]. [cited 2018 Aug 15]. Available from: <https://www.treehugger.com/cars/government-mandate-ev-chargers-standard-new-uk-homes.html>
- [12] Goldman J. Comparing Electric Vehicles: Hybrid vs. BEV vs. PHEV vs. FCEV - Union of Concerned Scientists [Internet]. [cited 2018 Aug 15]. Available from: <https://blog.ucsusa.org/josh-goldman/comparing-electric-vehicles-hybrid-vs-bev-vs-phev-vs-fcev-411>
- [13] Brennan S, Alleyne A. The Use of a Scale Vehicle Testbed for Controller Design and Evaluation. *IEEE Control Syst Mag.* 2001;21(3):15–26.
- [14] Liburdi A. Development of a Scale Vehicle Dynamics Test Bed. University of Windsor;

2010.

- [15] Milliken WF, Milliken DL. Race Car Vehicle Dynamics. SAE International. Warrendale, United States: SAE International; 1995. 918 p.
- [16] Lapapong S, Gupta V, Callejas E, Brennan S. Fidelity of using scaled vehicles for chassis dynamic studies. *Veh Syst Dyn*. 2009;47(11):1401–37.
- [17] Brennan SN. Modeling And Control Issues Associated With Scaled Vehicles. Masters Thesis. The University of Illinois; 1999.
- [18] Wang R, Wang J. Stability control of electric vehicles with four independently actuated wheels. *Proc IEEE Conf Decis Control*. 2011;(2):2511–6.
- [19] History of Car Safety - Crash Test [Internet]. [cited 2018 Aug 31]. Available from: <http://www.crashtest.org/history-car-safety/>
- [20] The evolution of car safety: a history | Auto Express [Internet]. [cited 2018 Aug 31]. Available from: <https://www.autoexpress.co.uk/car-news/90221/the-evolution-of-car-safety-a-history>
- [21] Comportamento das rodas em curva com o diferencial mecânico [Internet]. [cited 2018 Oct 29]. Available from: <https://www.skoda-motorsport.com/en/differential-why-your-car-can-turn-automotive-technology/>
- [22] How Differentials Work | HowStuffWorks [Internet]. [cited 2018 Aug 31]. Available from: <https://auto.howstuffworks.com/differential.htm>
- [23] Traction Control Explained | HowStuffWorks [Internet]. [cited 2018 Aug 31]. Available from: <https://auto.howstuffworks.com/28000-traction-control-explained.htm>
- [24] Sistema de controlo de tração (TCS) [Internet]. [cited 2018 Oct 29]. Available from: <https://www.seat.com/car-terms/e/electronic-stabilisation-programme.html>
- [25] Sistema de controlo de estabilidade (ESP) [Internet]. [cited 2018 Oct 22]. Available from: <http://autonationdrive.com/understanding-traction-and-stability-control-systems/>
- [26] History of 4WD Vehicles [Internet]. [cited 2018 Sep 27]. Available from: <http://webuyposhcars.co.uk/the-complete-history-of-4wd-vehicles/>
- [27] The History Of The 4 Wheel Drive [Internet]. [cited 2018 Sep 27]. Available from: https://www.uniquecarsandparts.com.au/history_4_wheel_drive
- [28] Ten electric cars we're excited about in 2018 | Top Gear [Internet]. [cited 2018 Sep 27]. Available from: <https://www.topgear.com/car-news/electric/ten-electric-cars-were-excited-about-2018>
- [29] Chen Y, Wang J. Design and evaluation on electric differentials for overactuated electric ground vehicles with four independent in-wheel motors. *IEEE Trans Veh Technol*. 2012;61(4):1534–42.
- [30] Fraser A, Whitehead A. In-Wheel Technologies How are Brakes being Redefined ? Protean [Internet]. 2012;(November). Available from: http://www.proteanelectric.com/en/wp-content/uploads/2013/07/In_Wheel_Tech_Brakes_Redefined_AF_AWh_V611132012b.pdf
- [31] Hasan MMAE, Ektesabi M, Kapoor A. Using Sliding Mode Controller for an In-wheel Electric Vehicle. In: *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*. 2013. p. 13–5.
- [32] Xue XD, Cheng KWE, Ng TW, Cheung NC. Multi-Objective Optimization Design of In-Wheel Switched Reluctance Motors in Electric Vehicles. *IEEE Trans Ind Electron*. 2010;57(9):2980–7.
- [33] Masson L. The Pros and Cons of Using In-Wheel Motors in Electric Cars | PluginCars.com [Internet]. [cited 2018 Sep 2]. Available from: <http://www.plugincars.com/pros-and-cons->

wheel-motors-127174.html

- [34] Guazzelli P, Suetake M, Evangelista S, De Francisco C, Ogashawara O. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE VEÍCULO ELÉTRICO COM MOTOR DE INDUÇÃO CONTROLADO POR SISTEMA FUZZY PD INCREMENTAL. In: Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics. 2016. p. 4.
- [35] Hoblet P, O'Brien RTJ, Piepmeier JA. Scale-model vehicle analysis for the design of a steering controller. In: Proceedings of the 35th Southeastern Symposium on System Theory. IEEE; 2003. p. 201–5.
- [36] Ang KH, Chong GC, Li Y. PID control system analysis, design, and technology. In: IEEE Transactions on Control Systems Technology. 2005. p. 559–76.
- [37] Brand L. The Pi Theorem of Dimensional Analysis. In: Archive for Rational Mechanics and Analysis. 1957. p. 35–45.
- [38] Munson BR, Young DF, Okiishi TH. Fundamentals of Fluid Dynamics - Second Edition. 2nd Revise. New York: I K International Publishing House; 1994. 769 p.
- [39] Brennan S, Alleyne A, DePoorter M. The Illinois Roadway Simulator-A Hardware-in-the-Loop Testbed for Vehicle Dynamics and Control. In: Proceedings of the American Control Conference. 1998. p. 493–7.
- [40] Eaves S, Eaves J. A Cost Comparison of Fuel-Cell and Battery Electric Vehicles. J Power Sources. 2004;130(1–2):208–12.
- [41] Dhameja S. Electric Vehicle Battery Systems. Newnes Press, editor. Boston; 2002. 252 p.
- [42] Thomas CE. Fuel cell and battery electric vehicles compared. Int J Hydrogen Energy. 2009;34(15):6005–20.
- [43] Grego BA da S. Segurança Automóvel: Sistemas de Apoio à Condução. Universidade de Aveiro; 2016.
- [44] Toy state. Nikko [Internet]. 2018. Available from: <http://www.toystate.com>
- [45] MathWorks. Gear box in mechanical systems [Internet]. 2018. Available from: <http://www.mathworks.com/help/physmod/simscape/ref/gearbox.html>
- [46] Precision Microdrives [Internet]. 2018. Available from: <https://www.precisionmicrodrives.com/>
- [47] Dc motor [Internet]. [cited 2018 Oct 29]. Available from: <https://www.pololu.com/product/2212/specs>
- [48] Chan CC, Bouscayrol A, Chen K. Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling. IEEE Trans Veh Technol. 2010;59(2):589–98.
- [49] Leens F. An introduction to I2C and SPI protocols. IEEE Instrum Meas Mag. 2009 Feb;12(1):8–13.

7. Modelo 3D

